

مجموعة الكتب الهندسية

١٢١

نظريات وتضميم الآلات الكهربائية

الآلات المتزامنة والمحولات الكهربائية

دكتور هندس

محمد أحمد متسر

أستاذ الآلات الكهربائية بكلية الهندسة

جامعة الإسكندرية

الناشر: **مكتبة** دار الفكر

مجموعة الكتب الهندية

نظريات وتصميم الآلات الكهربائية

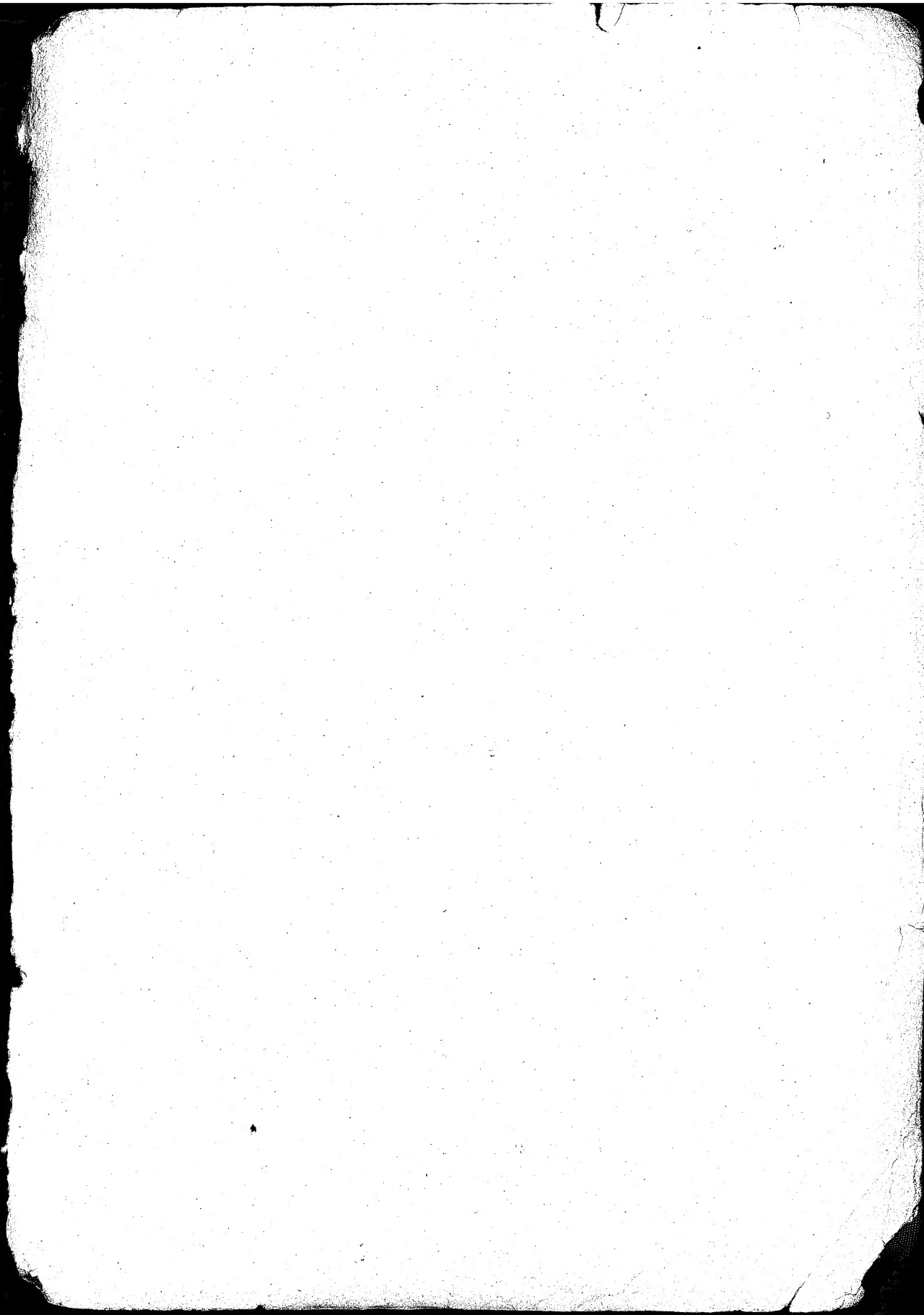
الآلات المتزامنة والمحولات الكهربائية

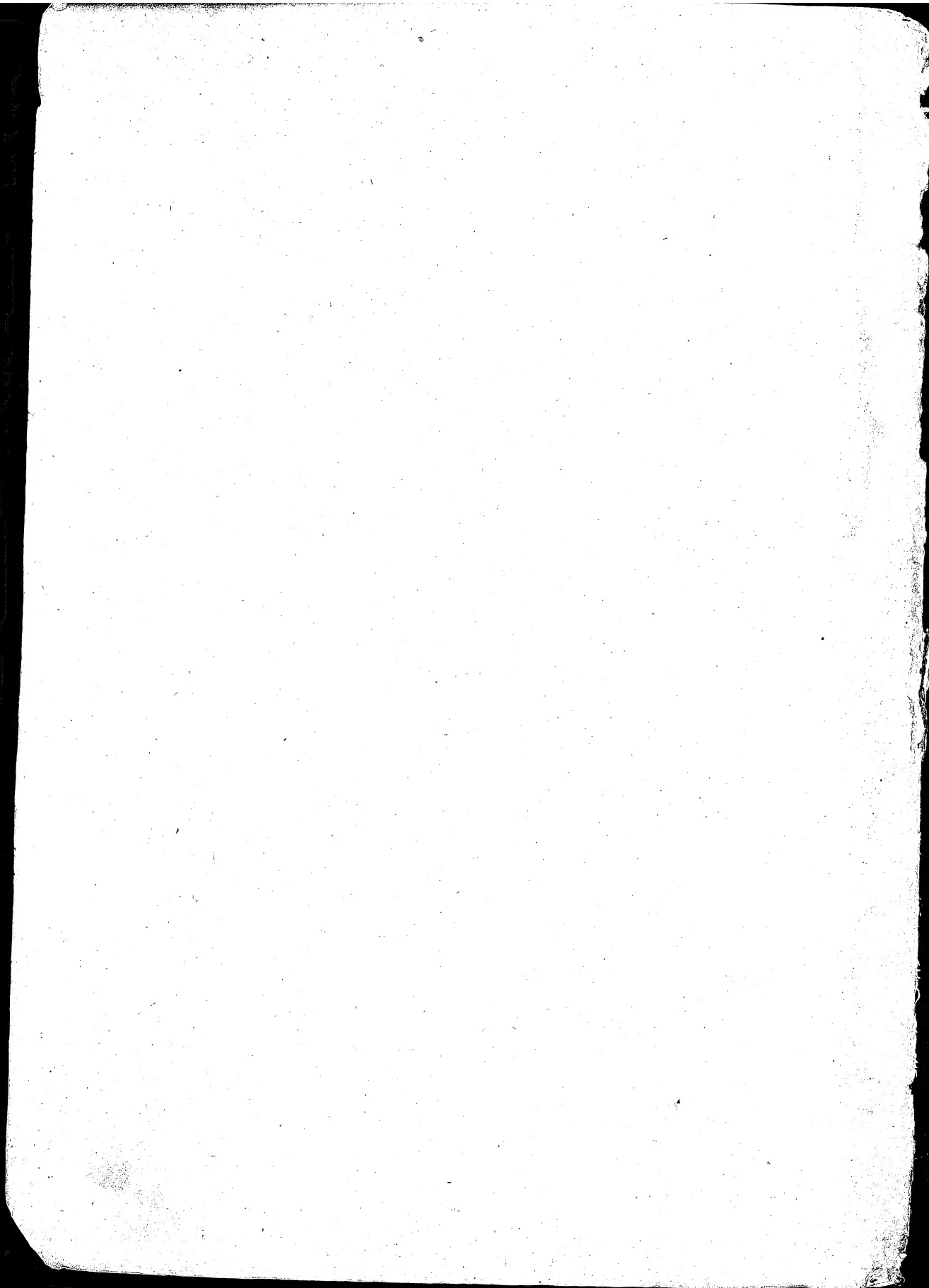
دكتور هندس

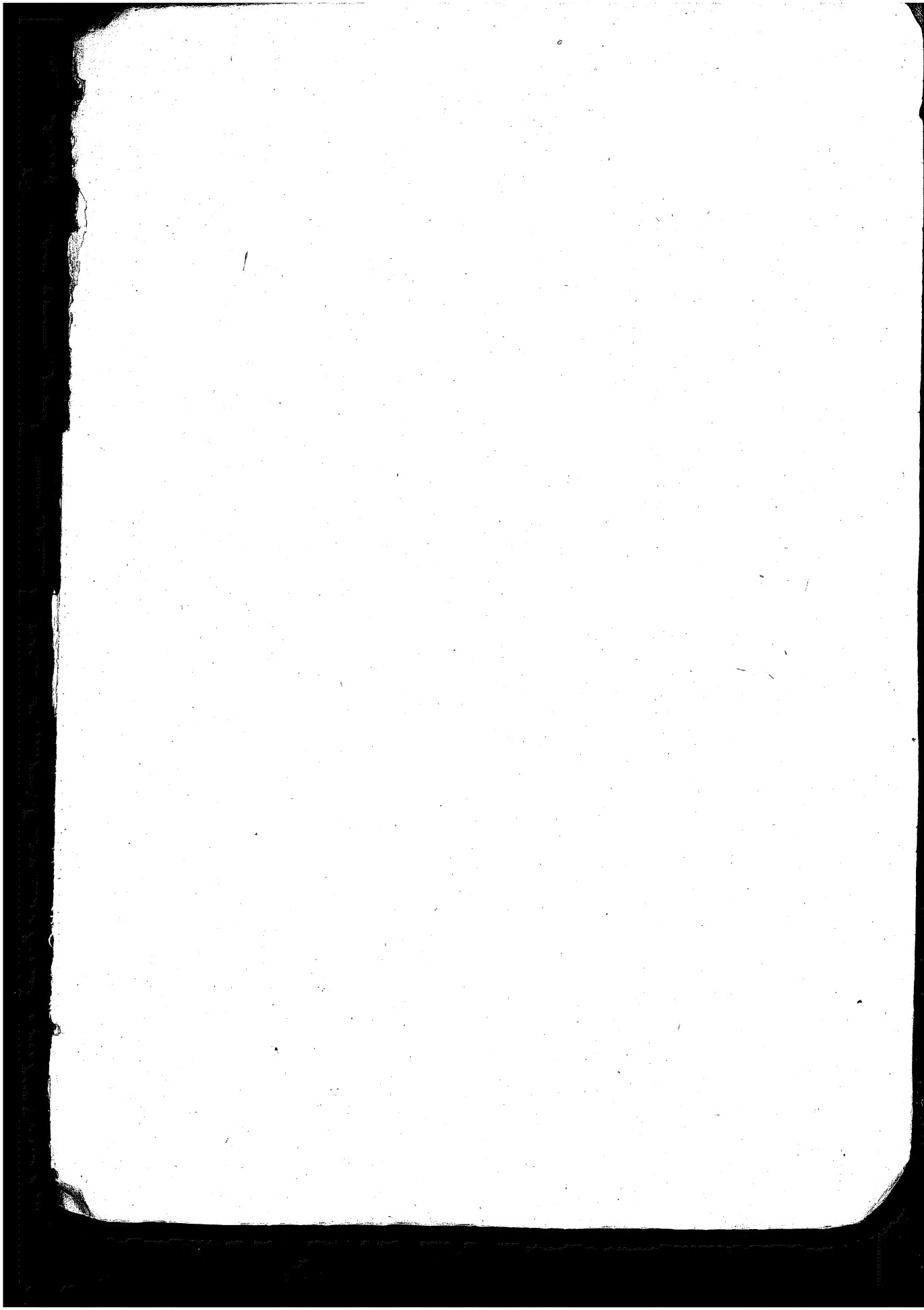
محمد أحمد حسن

أستاذ الآلات الكهربائية بكلية الهندسة
جامعة الإسكندرية

الناشر: **مكتبة** دار الفكر بالاسكندرية







نظريات وتصميم الآلات الكهربائية

الآلات المتزامنة والدحولات الكهربائية

تأليف

دكتور مهندس

محمد أحمد متسر

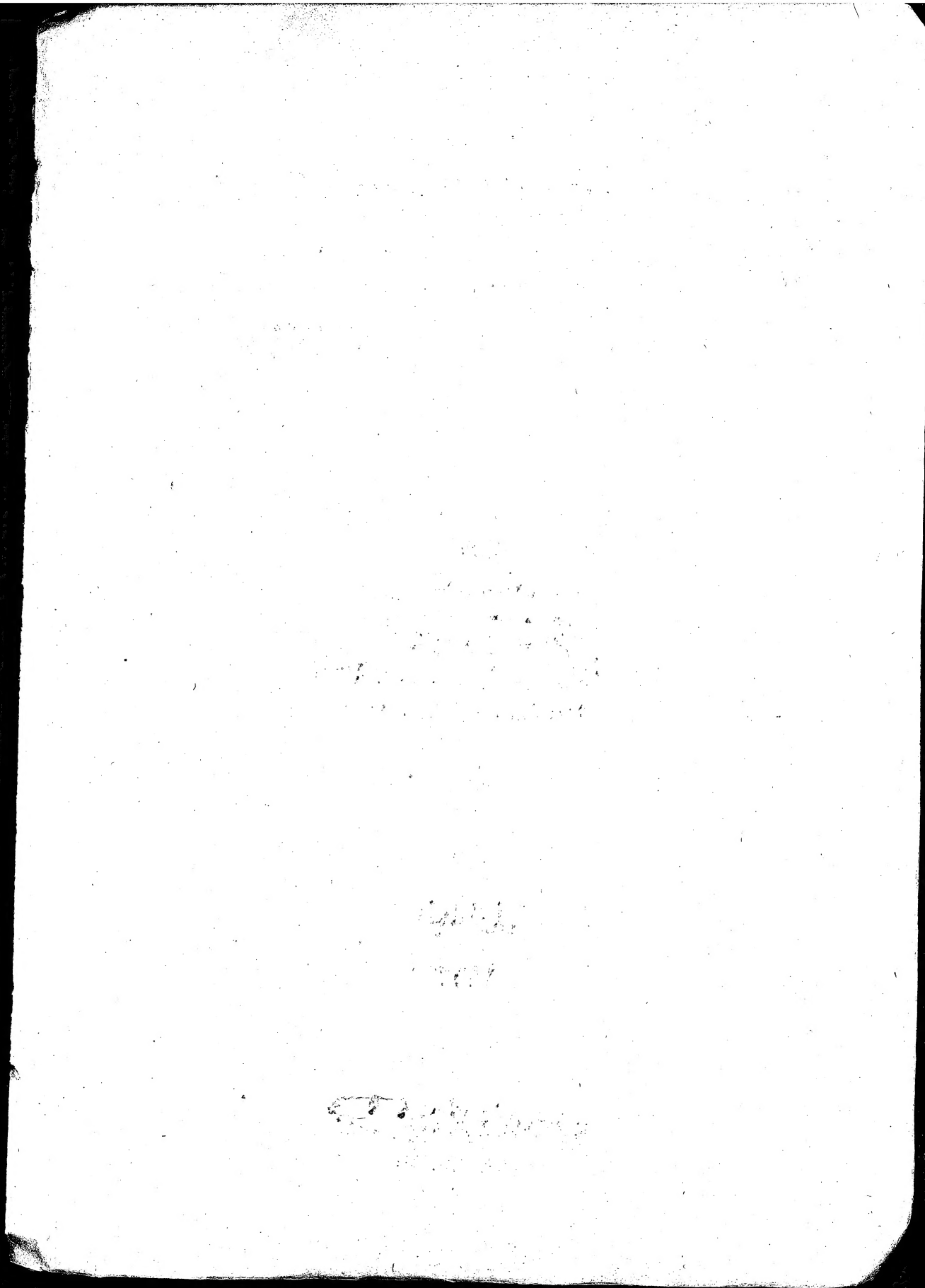
أستاذ الآلات الكهربائية بكلية الهندسة
جامعة الإسكندرية

طبعة أولى

١٩٧٣

الناشر  منشأة
فـا بالاسكندرية

جلال حنري وشركاه



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

رَبَّنَا آتِنَا مِنْ لَدُنْكَ رَحْمَةً وَهِيَ لَنَا مِنْ أَمْرِنَا رَشَدًا ۝

۔ فراتے کریم ۔

1845

1846

1847

مقدمة

هذا هو الكتاب الثانى ، فى مجموعة الكتب ، التى آليت على نفسى أن أقوم بتأليفها ، فى علم هندسة الآلات الكهربائية ، باللغة العربية ، لىكون دليلا للدارسين العرب ، فى الجامعات والمعاهد ، وغيرها من دور العلم ، فى وطنى العربى الكبير ، يأخذ بيدهم ، ويساعدهم على تفهم هذا العلم ، الذى يعتبر ، بحق ، من أصعب العلوم التكنولوجية ، فى مجال الهندسة الكهربائية .

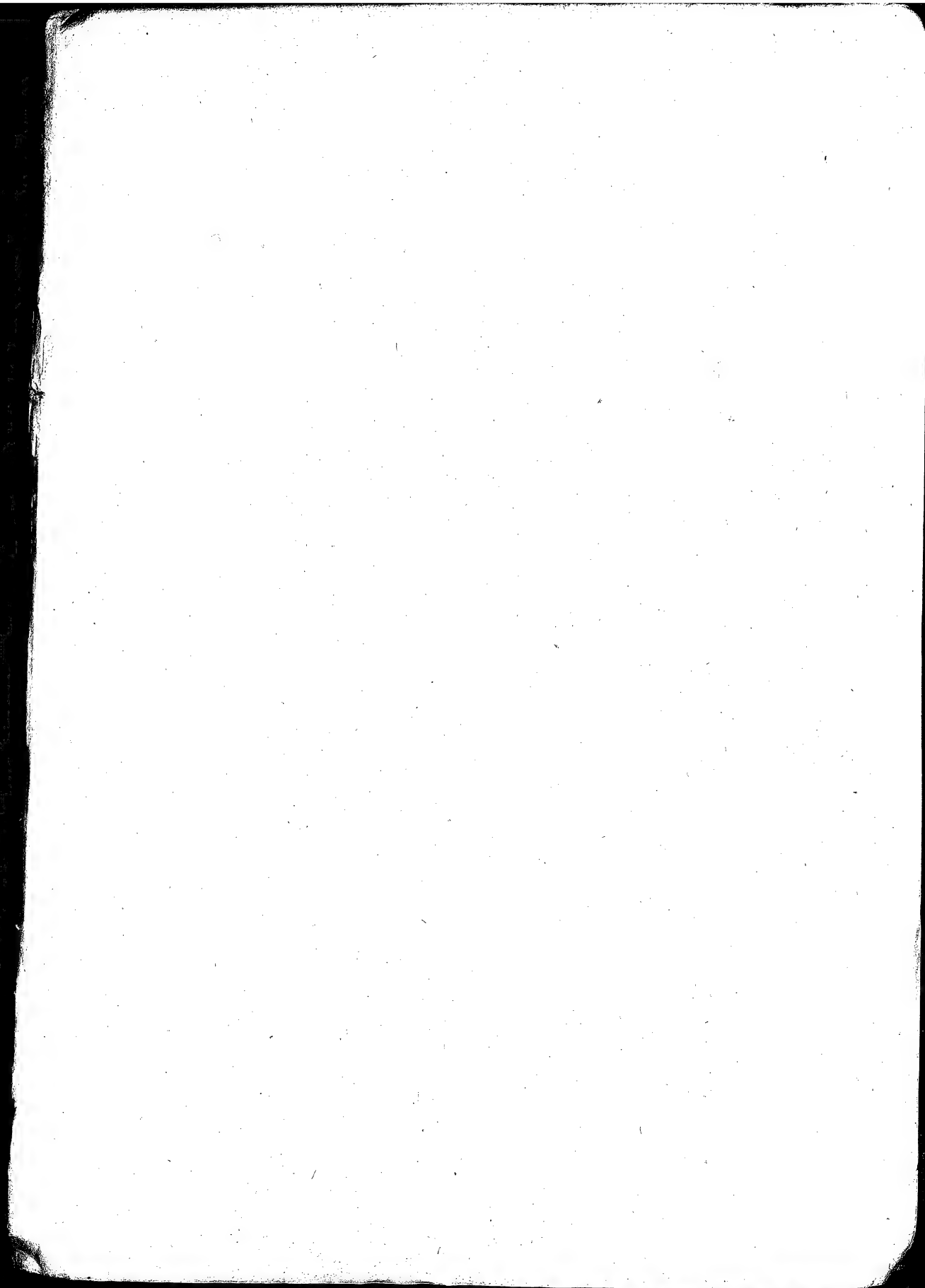
وانه ليثلج صدرى ، ويساعدنى على المضى فى سبيلى ، ما تفضل به على ، اخوانى من الاساتذة المختصين ، بالثناء والتشجيع ، وما لمست به نفسى ، وعبر عنه الكثيرون من أبنائى الطلبة ، من تيسير الأمر عليهم ، فى دراسة علم هندسة الآلات الكهربائية ، نتيجة لهذا النهج فى الشرح والتفسير .

ولقد سرت ، فى هذا الكتاب ، على نفس النمط ، مثل الكتاب السابق ، بالنسبة لطريقة عرض الموضوعات وتسلسلها ، ثم ختام كل باب من أبوابه بالأمثلة المحولة ، والمسائل التى تساعد الدارس على استيعاب التطبيقات المختلفة ، الخاصة بما ورد فى هذا الباب ، لىكون الدارس على أساس تكنولوجى سليم .

ولا يفوتنى أن أنوه هنا بالجهود المشكورة ، التى يبذلها الناشر منشأة المعارف (جلال حذى وشركاه) ، فى تيسير المهمة التى أخذتها على عاتقى ، وأن أشكر رجال شركة الاسكندرية للطباعة والنشر ، وكل من عاون فى اخراج الكتاب بهذا الشكل المشرف الجميل .

نسأل الله تعالى السداد والتوفيق فى كل ما نرجوه ، لأنه نعم المولى ، ونعم النصير .

الاسكندرية فى ذى القعدة ١٣٩٢ يناير ١٩٧٣ دكتور محمد احمد قهر



الباب الأول

ملفات المنتج في آلات التيار المتردد

(armature Windings in alternating current Machines)

قواعد عامة :

يمثل المنتج (armature) في آلات التيار المتردد العضو الثابت (stator)
الآلة عادة ، على عكس ما هو مألوف في آلات التيار المستمر ، حيث يكون
المنتج هو العضو الدائر (rotor) في الآلة ، وذلك في حالة آلات التيار المتردد
متوسطة وكبيرة الحجم ، أما الآلات المتزامنة صغيرة الحجم فتكون على نمط
آلات التيار المستمر من هذه الناحية . ويحتوى المنتج على عدد معين من المجارى
S وهى التى توضع فيها الموصلات وعددها الكلى z . ومن هذه الموصلات تتكون
اللفات التى عددها N ، لفة من كل موصلين ، بحيث يرتبط عدد اللفات بعدد
الموصلات بالعلاقة $N = \frac{z}{2}$. تتكون ملفات المنتج التى عددها C من هذه
اللفات بحيث يكون $C = \frac{N}{2n}$ حيث n هى عدد اللفات في كل ملف . ولا
تختلف هذه القواعد كلها عن مثيلاتها التى مرت بنا عند دراسة ملفات المنتج في
آلات التيار المستمر . إلا أنه بينما نجد أن الملفات تكون من النوع مزدوج
الطبقة (two layer winding) بدون استثناء في آلات التيار المستمر ، نجد
أن الملفات يمكن أن تكون في آلات التيار المتردد أيضا من النوع أحادى الطبقة
(single layer Winding) . هذا كما أنه في آلات التيار المتردد لا يحتل الطبقة
الواحدة في المجرى ، سواء كانت علوية أو سفلية ، أو كانت مفردة ، سوى جانب

واحد من جوانب الملفات . وفي هذه الحالة نجد أن عدد الملفات يساوى عدد
المجارى ($S = C$) فى آلات التيار المتردد التى تحتوى على ملفات مزدوجة
الطبقة ، بينما نجد أن عدد الملفات يساوى نصف عدد المجارى ($C = \frac{S}{2}$)
فى الآلات التى تحتوى على ملفات أحادية الطبقة .

ونظراً لأن آلات التيار المتردد التى نحن بصدد دراستها تكون ثلاثية
المراحل (أو الأوجه) (3 - phase) تقسم المجارى على المراحل الثلاث
بالتساوى ، وكذلك الملفات واللفات ، بحيث يخص كل مرحلة نفس العدد من
المجارى ، وبالتالى من الملفات واللفات ، تحت كل قطب من أقطاب الآلة البالغ
عددها $2p$. فإذا رمزنا لعدد المجارى لكل مرحلة تحت كل قطب بالرمز q نجد أن
 $q = \frac{S}{3 \times 2p}$ ، بينما نجد أن عدد اللفات T_{ph} فى كل مرحلة $\frac{z}{6} = \frac{N}{3}$
فإذا كان u هو عدد الموصلات فى كل مجرى نجد أنه فى حالة الملفات مزوجة
الطبقة يكون :

$$T_{ph} = \frac{z}{6} = \frac{uS}{6} = \frac{uC}{6} = \frac{Cn}{3} = \frac{Sn}{3} = qup \dots \dots (1-1)$$

أما فى حالة الملفات أحادية الطبقة فنجد أن :

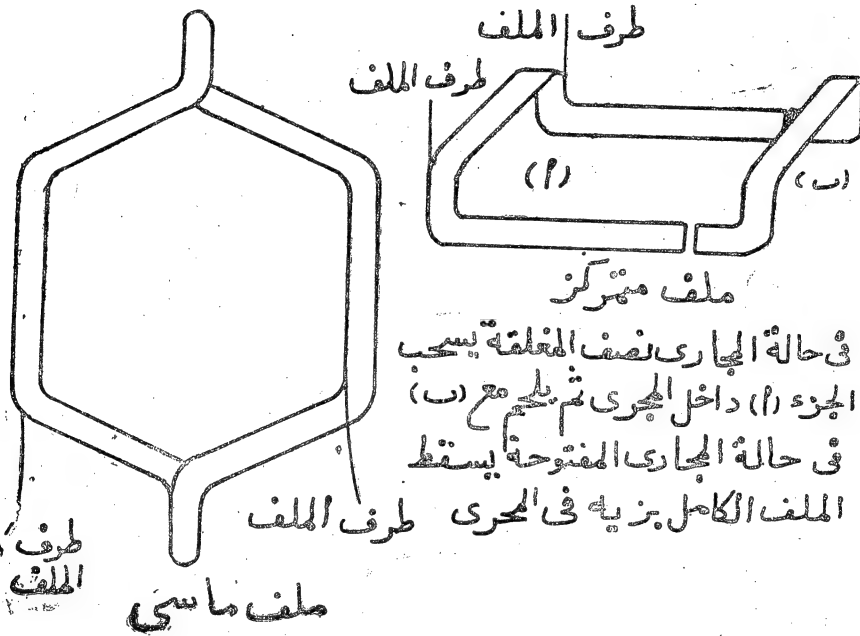
$$T_{ph} = \frac{z}{6} = \frac{uS}{6} = \frac{uC}{3} = \frac{Cn}{3} = \frac{Sn}{6} = qup \dots \dots (1-2)$$

نفترض دائماً ، على أساس من الواقع العملى ، أن التوزيع الفراغى
(space distribution) لكثافة الخطوط المغناطيسية عبارة عن منحنى جيبى
على مدى الخطوة القطبية ، بحيث تكون قيمة الكثافة فى نهايتها العظمى عند منتصف
القطب ، وصفر عند خط التعادل بين كل قطبين . هذا يعنى أن القوة الدافعة

الكهربية للموصلات في المجرى الواحد تبلغ نهايتها العظمى في القيمة عندما يمر محور القطب أمام المجرى ، وتتناقص على منحنى جيبي حتى تصبح صفراً عندما يمر محور التعادل بين القطبين أمام الموصل . وهذا كله على أساس أن سرعة دوران الأقطاب الموجودة على العضو الدائر ثابتة ، وهي عبارة عن سرعة التزامن n_s (Synchronous speed) . ويرتبط تردد القوة الدافعة الكهربائية f المتولدة في الموصلات على هذا النحو ، وتردد ما يمكن أن يندرج عنها من تيارات كهربائية بالعلاقة المعروفة $f = p \frac{n_s}{60}$ (راجع البنود الخمسة الأولى في الباب الثالث من المبادئ الأساسية وآلات التيار المستمر) .

يتضح مما سبق ذكره أن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في جوانب الملفات تختلف عن بعضها البعض مرحلياً على حسب مواقعها في المجرى . ويمكن في هذه الحالة لاتخاذ مجموع القوى الكهربائية المتولدة في الموصلات التي يتكون منها جانب الملف ، والتي تقع في نفس المجرى ، كوحدة (وهي تساوي القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في موصل واحد مضروبة في عدد الموصلات في جانب الملف وهو n) ، وذلك على أساس أن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في الموصلات الموجودة في نفس المجرى متفقة معاً مرحلياً (in phase) . سوف نعتبر على هذا الأساس أن جانب الملف هو الوحدة التي نستخدمها عند إجراء عملية الف الملتيج ، ونرمز له بمتجه يمثل طوله مجموع القوى الدافعة الكهربائية المتولدة في الموصلات التي يتكون منها وهي في نهايتها العظمى . لذلك سوف نقوم بإجراء عملية الف باعتبار أن الموصلات قد تم تحويلها إلى ملفات جاهزة ذات شكل معين (سوف ندرس تأثير هذا الشكل على طريقة الف فيما بعد) ، يحوى كل منها على عدد معين من اللفات n ، ولكل منها نهايتان (two terminals) ، نعتبر أحدهما بدايته

(start) ، والأخرى منتهاه (Finish) . وتستخدم هاتان النهايتان لتوصيل الملفات ببعضها البعض عند إجراء عملية لف المنتج . يبين شكل (١-١) الأشكال المعتادة لمثل هذه الملفات .



شكل (١-١)

بخصوص وضع جانبي الملف الواحد بالنسبة لبعضها على محيط المنتج ، يوجد نوعان من الملفات يتحدد بناء على ذلك ، وهما :

١ - الملفات كاملة الخطوة (Full Pitch Windings) : يراعى في هذه الحالة أن يكون اتساع الملف (coil span) ، وهي عبارة عن المسافة التي يحصرها الملف بين جانبيه على محيط المنتج ، تبلغ خطوة قطبية كامله . ويقال للملف حينئذ إنه ماف كامل الخطوة (Full pitch coil) . وينتج عن ذلك أن تكون القوى الدافعة الكهربائية المتولدة في أحد جانبي الملف مختلفة مرحلياً عن

تلك التى تتولد فى الجانب الآخر بزواوية مقدارها 180° (أو π زاوية كهربية نصف قطرية) تماماً ، مما يجعلنا نجمع مقادير هذه القوى جميعها عددياً لى نحصل على القوة الدافعة الكهربائية الكلية التى يعطيها الملف بأكمله ، كما سبق أن فعلناه فى حالة آلات التيار المستمر .

٢ — الملفات كسرية الخطوة (Fractional Pitch Windings) : ويطلق عليها أيضاً الملفات الوترية (Chorded Windings) ، ويختلف اتساع الملف فى هذه الحالة عن خطوة قطبية كاملة . فقد يكون أقل من ذلك وهو الغالب ، وقد يكون أكبر (وهذا يمكن من الناحية النظرية فقط ، ولا يطبق عملياً بسبب الزيادة التى لا فائدة منها فى التوصيلات الطرفية للملفات) ويقال للملف حينئذ إنه ملف وترى (chorded coil) . ويتوقف تغيير اتساع الملف عن الخطوة القطبية الكاملة على اعتبارات تتعلق بمنحنى القوة الدافعة الكهربائية المرحلية (Wave form of phase voltage) وتوافقيات الضغط (Voltage Harmonics) التى يحتوى عليها ، كما سنبين بالتفصيل فى حينه المناسب . ولكن يمكننا أن نذكر الآن أن اتساع الملفات الوترية يكون فى العادة ثلثى الخطوة القطبية للتخلص من توافقيات الضغط الثالثة (Voltage third harmonic) فى منحنى الضغط المرحلى . وعلى حسب اختلاف اتساع الملف عن الخطوة القطبية نجد أن المتجه الذى يمثل مجموع القوى الدافعة الكهربائية فى أحد جانبي الملف يختلف مرحلياً عن المتجه الذى يمثل مجموع القوى الدافعة الكهربائية فى الجانب الآخر بزواوية أقل من 180° درجة كهربية ، بحيث تكون قيمة القوة الدافعة الكهربائية الكلية التى نحصل عليها من الملف أقل من ضعف قيمة أحد هذين المتجهين كما كان فى الحالة السابقة . وفى هذه الحالة يجب جمع المتجهين ، مع اعتبار زاوية الاختلاف المرحلى بينهما ، للحصول على القوة الدافعة الكهربائية الكلية التى يعطيها الملف .

يستلزم الحصول على تخطيط يبين ترتيب الملفات فى مجارى العضو الثابت
لآلة التيار المتردد ثلاثية المراحل أن نفرق أساساً بين نوعين من الملفات ، وهما
الملفات أحادية الطبقة ، والملفات مزدوجة الطبقة ، وفى كلتا الحالتين تستعين بما
يسمى مخطط نجمة المجارى (Slots star diagram) .

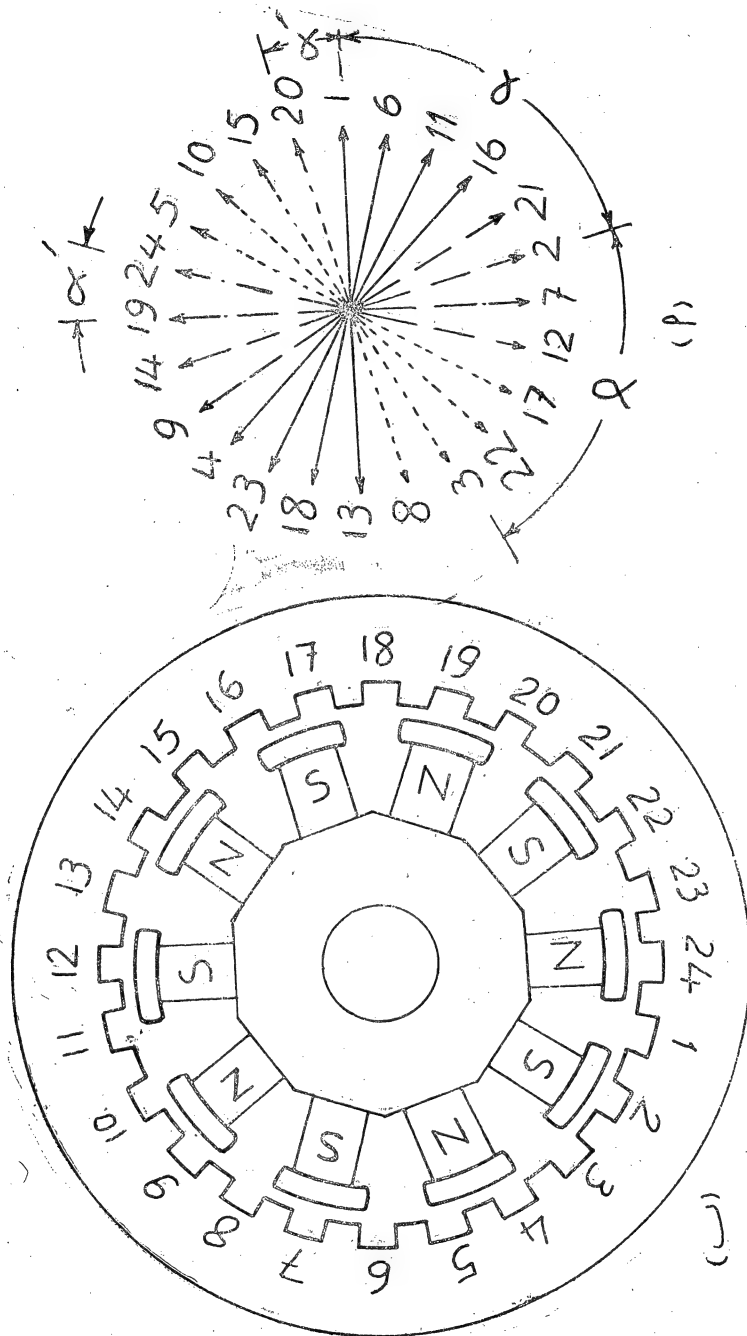
أولاً - الملفات أحادية الطبقة:

مخطط نجمة المجارى :

يمثل كل جانب من جوانب الملفات ، فى حالة الملفات أحادية الطبقة ،
بجربى بأكمله . ويمثل جانب الملف ، أو المجرى فى هذه الحالة ، بمتجه يتناسب
طوله مع مجموع مقادير القوى الدافعة الكهربائية المتولدة فى الموصلات التى يحتوى
عليها هذا الجانب وهى فى قيمة النهاية العظمى لها ، كما سبق شرحه . ويمكن
تحديد مجرى معين وإعطائه رقم 1 واعتبار أن متجه القوة الدافعة الكهربائية للجانب
الملف الراقده فيه منطبقاً على المحور المرجعى (reference axis) فى مخطط
المتجهات ، على أساس أن محاور التعادل بين قطبين فى الآلة قد انطبق على محور
هذا المجرى فى اللحظة المفروضة ، شكل (٢ - ١ ب) ، الذى يبين آلة ذات
عشرة أقطاب ومنتج يحتوى على أربعة وعشرين مجرى .

إذا أعطينا المجارى أرقاماً متتالية على حسب ترتيبها مع المجرى رقم 1 ،
كما هو مبين على نفس الشكل ، نجد أن زاوية الاختلاف المرحلى بين متجهات
القوى الدافعة الكهربائية لجوانب الملفات فى المجارى المتعاقبة هى نفس الزاوية
الكهربية α الواقعة بين كل مجرىين متتالين ، وقيمتها فى هذه الحالة هى :

$$\alpha = \frac{360 p}{S} = \frac{360 \times 5}{24} = 75 \text{ درجة كهربية}$$



شكل (٢-١-١) (ب)

يبين شكل (٢-١) مخطط متجهات القوى الدافعة الكهربائية لجوانب الملفات وعلى كل منها رقم المجرى الذي يوجد به جانب الملف المناظر ، وهذا هو ما يطلق عليه عادة اسم مخطط نجمة المجارى .

نلاحظ أننا نحصل فى مخطط المتجهات هذا على عدد من المتجهات يساوى عدد المجاوى S وهو 24 ويفصل بين كل اثنين منها الزاوية α' حيث :

$$\alpha' = \frac{360}{S} = \frac{360}{24} = 15 \text{ درجة}$$

أى أننا نستطيع رسم مخطط نجمة المجارى لهذه الآلة برسم عدد S من المتجهات ذات الأطوال المتساوية التى يفصل بين كل اثنين منها الزاوية α' .
نختار من هذه المتجهات واحداً ونضع عليه الرقم 1 بما يعنى أننا اخترنا أحد المجارى لىكى نبدأ عنده الف وأعطيناه هذا الرقم أيضاً . ويكون متجه القوة الدافعة الكهربائية لجانب الملف الواقع فى المجرى رقم 2 ، التالى للمجرى رقم 1 فى اتجاه الدوران ، وهو الذى يعطى الرقم 2 أيضاً فى مخطط نجمة المجارى ، واقماً بعد زاوية مقدارها α من المتجه رقم 1 ، وهكذا . ويلاحظ فى هذا المضمار أن α مكرر صحيح لـ α' وأن درجة التكرار هى العدد الصحيح p حيث $\alpha = p\alpha'$ وهذا كله موضح فى شكل (٢-١) .

يلاحظ أن قيمة q فى هذه الحالة كسراً ، حيث $q = \frac{4}{5}$ لذلك نحصل على ملفات ذات خواص معينة ، سوف نبحثها بالتفصيل فيما بعد ، ويطلق عليها اسم الملفات كسرية المجرى . ولكن مايعنيننا فى الوقت الحاضر من هذا المثال هو الطريقة التى تتبع فى رسم مخطط نجمة المجارى ، وكيفية استخدامه لتحديد جوانب الملفات الخاصة بالمراحل المختلفة . هذا وسوف تجد توصيل الملفات لهذا

المثال مبيّنا في شكل (٢٠-١) مع الجزء الخاص بالملفات كسرية المجرى .

وقد استعنا لهذا الغرض بطبيعة الحال بمخطط نجمة المجارى في شكل (٢-١) .

إذا كانت كل من p, S تقبل القسمة على معامل مشترك بينهما هو F فإن هذا يعنى أن هناك تكراراً لأوضاع المجارى بالنسبة لأزواج الأقطاب درجته F ، مما يترتب عليه أن يكون هناك F مجموعة من المجارى تحتل كل منها وضعا مماثلاً الأخرى بالضبط بالنسبة للأقطاب المغناطيسية . وفي هذه الحالة يصبح في كل مجموعة مجرى يحتل نفس الوضع بالنسبة للأقطاب المغناطيسية كذلك الذى يحتله نظيره في كل مجموعة من المجموعات الأخرى . وهذا يستلزم أن تكون متجهات القوى الدافعة الكهربائية لجوانب الملفات في هذه المجارى المتناظرة التى عددها F متساوية في القيمة ومتفقة معاً مراحلياً تمام الاتفاق ، مما يعنى أن المتجهات التى عددها S في مخطط نجمة المجارى سوف تنقسم إلى مجموعات متماثلة عددها F ، بحيث ينطبق كل متجه في إحدى المجموعات على نظائره من المجموعات الأخرى . ويكون الاجراء الخاص برسم مخطط نجمة المجارى في هذه الحالة بأن نبدأ أولاً بتحديد عدد المجموعات المتكررة F بإيجاد العامل المشترك الذى تقبل كل من p, S القسمة عليه ، فيكون عدد المتجهات التى نحتاج إلى رسمها في مخطط نجمة المجارى هو $\frac{S}{F}$ فقط ، يأخذ كل منها فى الترقيم F رقماً ، دالة على متجهات القوى الدافعة الكهربائية فى F من المجارى المتماثلة الوضع بالنسبة للأقطاب المغناطيسية فى الآلة . وتكون قيمة الزاوية α' التى تفصل بين كل متجهين من هذه المتجهات هى .

$$\alpha' = \frac{360}{S/F} = \frac{360 F}{S} \text{ درجة} \quad (١-٣)$$

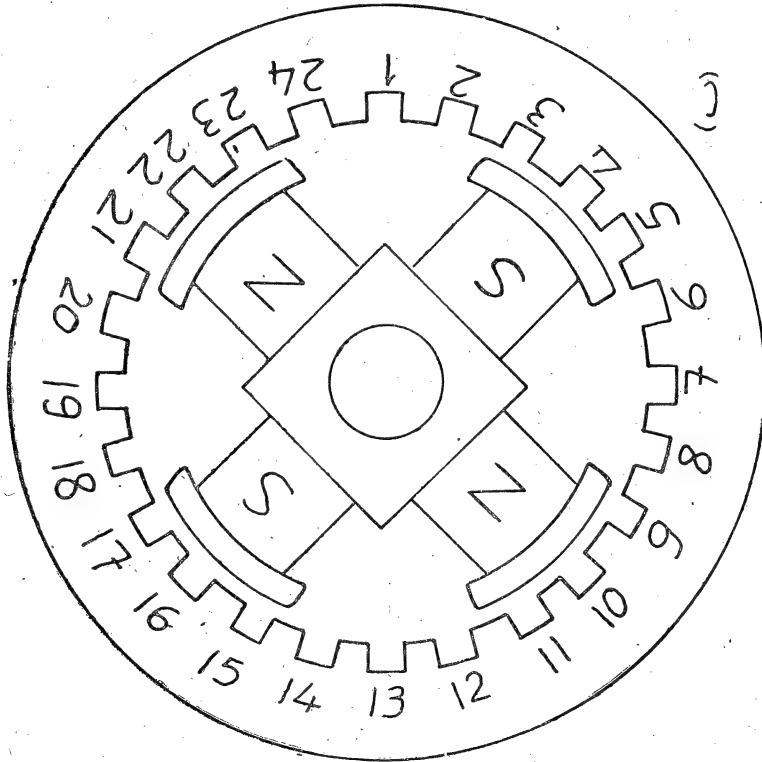
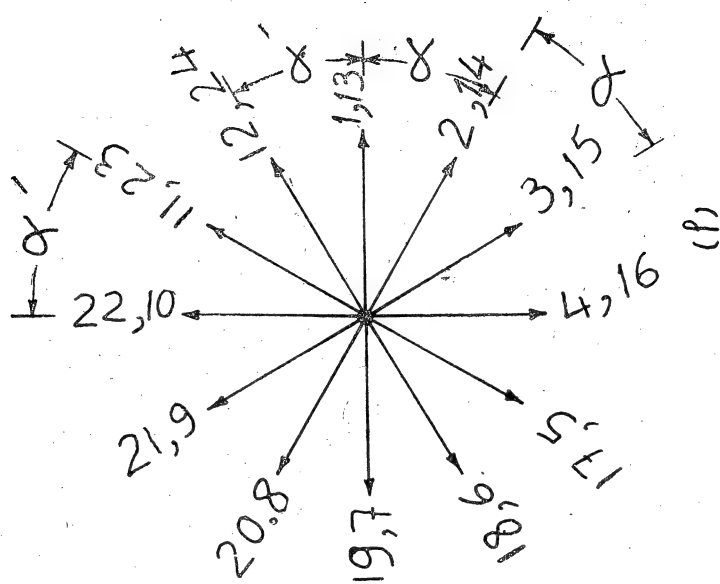
نأخذ مثالا على ذلك آلة تحتوي على $2p = 4$, $S = 24$ لنجد أن $p = 2$ ويكون هناك عامل مشترك $F = 2$ تقبل كل من S , p القسمة عليه . نحصل على كل من α , α' في هذه الحالة على النحو التالي .

$$\alpha = \frac{360 \times 2}{24} = 30^\circ , \quad \alpha' = \frac{360 \times 2}{24} = 30^\circ$$

وسوف نحصل على $\frac{S}{F} = 12$ متجها في خطوط نجمة المجارى ، يفصل بين كل اثنين منها الزاوية $\alpha' = 30^\circ$ ، ويحمل كل واحد منها $F=2$ رقماً ، مما يدل على أنه يمثل القوة الدافعة الكهربائية لجانبين من جوانب الملفات يقعان في مجريين يتخذان دائماً موضعين متماثلين تماماً بالنسبة لمجموعة الأقطاب المغناطيسية .
يبين شكل (١ - ٣ ، أ ، ب) خطوط نجمة المجارى وأوضاع المجارى بالنسبة لمجموعة الأقطاب المغناطيسية في هذه الحالة ، حيث يلاحظ أن المجرى رقم $\frac{S}{F} + x$ يأخذ وضعاً مماثلاً تماماً للمجرى رقم x ، أى أن المجرى رقم 1 يناظر المجرى رقم $13 = 1 + 12$ والمجرى رقم 5 يناظر المجرى رقم $17 = 5 + 12$ وهكذا ، كما أن هناك مجموعتين ($F = 2$) من المجارى متماثلتين في وضعها تماماً بالنسبة لمجموعة الأقطاب المغناطيسية ، وهما مجموعة المجارى من 1 إلى 12 ومجموعة المجارى من 13 إلى 24 . لذلك نجد أن متجهي القوة الدافعة الكهربائية للمجريين 1 و 13 منطبقان معاً في خطوط نجمة المجارى ، وكذلك بالنسبة للمجريين 2 و 14 ثم 3 و 15 ، وهكذا .

تكوين مجموعات الملفات (Coil Groups) والمراحل (phases) :

بعد تحديد الأوضاع المرحلية للقوى الدافعة الكهربائية المتولدة في جوانب الملفات في المجارى المختلفة على الآلة ، باستخدام خطوط نجمة المجارى ، نستطيع



شکل (۲-۱۱-ب)

الآن بالتوصيل المناسب بين كل جانبين من جوانب هذه الملفات معاً تكوين الملفات، كما نستطيع أيضاً بالتوصيل المناسب بين هذه الملفات، وجمعها في مجموعات، تكوين المراحل المطلوبة. وننتدى في هذه العمليات كلها بالقواعد التي تحكم هذه التوصيلات، والتي تعتمد غالباً على تحديد أوضاع مرحلية معينة، كما سبق الإشارة إليه في مواضع متفرقة.

بالنسبة لتكوين الملفات يتحدد جانبها الملف المناسب لتوصيلها معاً بناء على تحديد اتساع الملف أو خطوة اللف (winding pitch). فإذا كانت الملفات المطلوبة كاملة الخطوة، فإن هذا يعني ضرورة توصيل كل جانبين من جوانب الملفات معاً، عندما يتبين من مخطط نجمة المجارى أنها يولدان قوتين دافعتين كمريبتين بينهما اختلاف مرحلي مقداره 180 درجة كهربية بالضبط. ومن المهم جداً أن نراعى عمل أقصر التوصيلات بطريقة مدروسة، بحيث نحصل على ملفات منتظمة الترتيب، ومتماثلة بالنسبة لمراحل الآلة المختلفة. ولتوضيح ذلك نكمل حل المثال الأخير الخاص بشكل (٣-١).

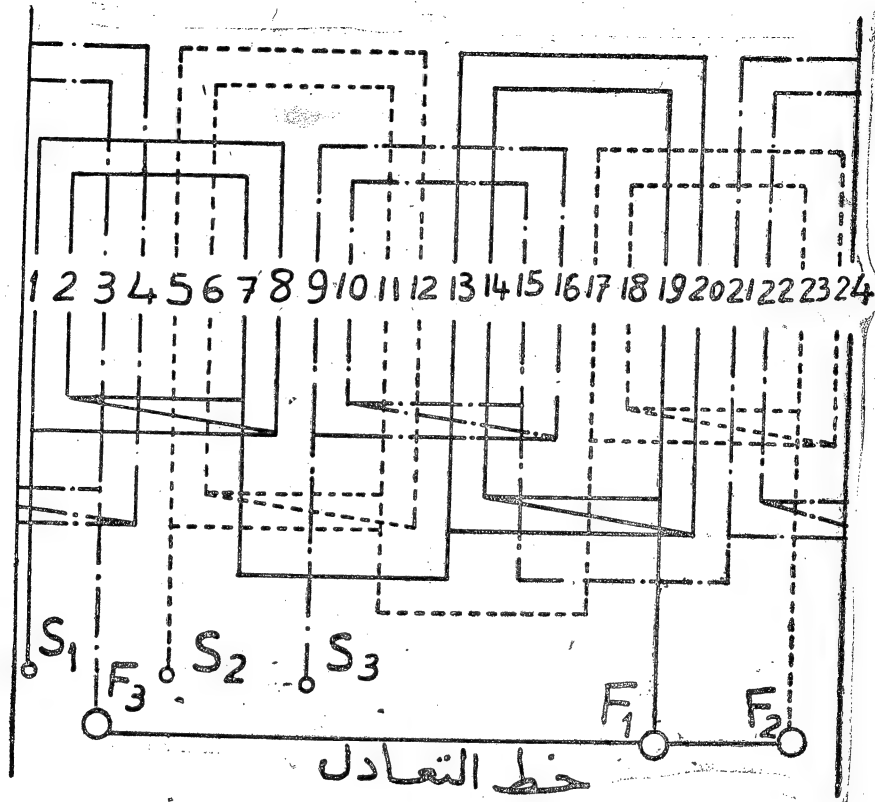
بالرجوع إلى مخطط نجمة المجارى في شكل (٣-١) نجد أن أقصر التوصيلات لتكوين الملفات تكون من 1 إلى 7 ومن 2 إلى 8 ومن 3 إلى 9، وهكذا. ونجد في هذه الحالة أن $p = 2$ بالنسبة للآلة ثلاثية المراحل، مما يعني أن كل مرحلة سوف تخصص بمجربين تحت كل قطب، وهذا يؤدي إلى وجود ملفين لكل مرحلة في كل خطوتين قطبيتين. يوصل هذان الملفان على التوالي معاً ويطلق عليهما معاً اسم مجموعة ملفات، وبذلك يصبح في كل مرحلة عدد p من مجموعات الملفات (أثنان في هذا المثال) تحتوى كل منها على عدد p من الملفات (أثنان أيضاً في هذا المثال). وتوصل مجموعات الملفات في كل مرحلة على التوالي معاً.

إلى هنا استطعنا ، بالإستعانة بمخطط نجمة المجارى ، تكوين الملفات ، كما
 قمنا بتقسيم هذه الملفات إلى مجموعات متماثلة ، ثم وزعنا هذه المجموعات المتماثلة
 على المراحل الثلاث فى الآلة بأنصبة متساوية . ولكن تكوين هذه المراحل
 بالأسلوب الصحيح يستلزم أن نحدد بداياتها ونهاياتها بحيث يتحقق شرط
 الاختلاف المرحلى المطلوب بينها ، وهو فى هذه الحالة ١٢٠ درجة كهربية . فإذا
 كانت المرحلة الأولى تبدأ بجانب الملف الواقع فى المجرى رقم 1 يجب أن تبدأ
 المرحلة الثانية بجانب الملف الذى يقع فى مجرى يبعد عن المجرى رقم 1 بزاوية
 مقدارها 120 درجة كهربية . ويتم تحديد هذا المجرى على النحو التالى :

مقدار الزاوية بين كل مجرىين بالدرجات الكهربائية هى :

$$\alpha = \frac{360 \times p}{S} = \frac{360 \times 2}{24} = 30^\circ$$

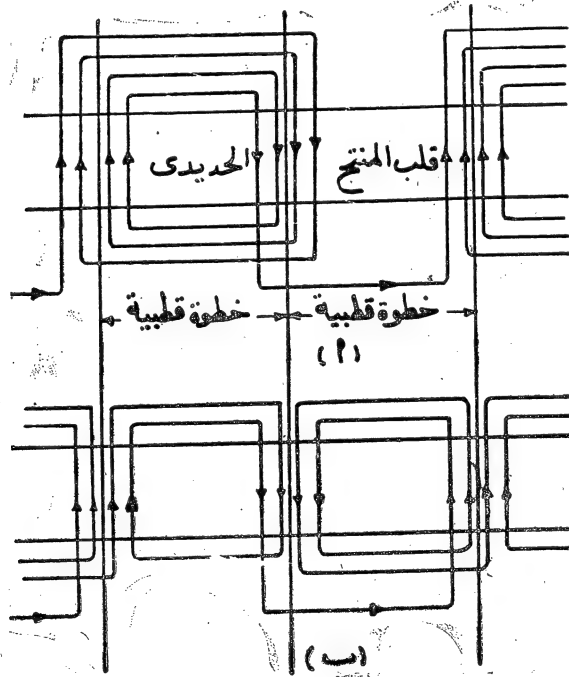
فيكون عدد المجارى اللازم تخطيطها لعمل زاوية اختلاف مرحلى 120
 درجة كهربية هو $\frac{120}{30} = 4$ ، بمعنى أن بداية المرحلة الثانية تقع فى المجرى
 رقم $5 = 1 + 4$. وعلى هذا الأساس فإن بداية المرحلة الثالثة سوف تقع
 فى المجرى رقم $9 = 5 + 4$. وإذا حدث أن $\frac{120}{\alpha}$ لا تنتج عدداً صحيحاً
 من المجارى ، نحاول نخطئ $\frac{120 + 360}{\alpha}$ من المجارى إذا كانت عدداً صحيحاً
 أو $\frac{120 + 720}{\alpha}$ ، وهكذا ، وذلك على أساس أننا يجب أن نخطئ عدداً
 صحيحاً من المجارى لتعيين بداية المرحلة التالية . فإذا تعذر ذلك فإن هذا يعنى
 أن الف غير قابل للتنفيذ ، ويجب إعادة تصميم الآلة من جديد للحصول على
 القيم المناسبة لكل من $2p$ ، S .



شكل (٤-١)

يبين شكل (٤-١) الرسم التخطيطي للملفات بعد تنفيذها على النحو السابق. بقي لكي نستكمل هذا الموضوع أن نشير إلى الإجراءات التي تتخذ لترتيب التوصيلات الطرفية (End Connections) للملفات التي تتكون منها التوصيلات المعلقة (Overhangs) للملفات ، بحيث لا تتضارب التوصيلات المعلقة لمجموعات الملفات المختلفة في مواضعها على جانبي الآلة . وهذا يستدعي شرح الطرق المختلفة التي استقر الاتفاق عليها بالنسبة لتشكيل الملفات عند تكوينها ، بحيث تعطى عند وضعها في المجارى التنظيم المطلوب . ويجب أن نميز في هذا المضمار بين نوعين أساسيين من أنواع الملفات وهما :

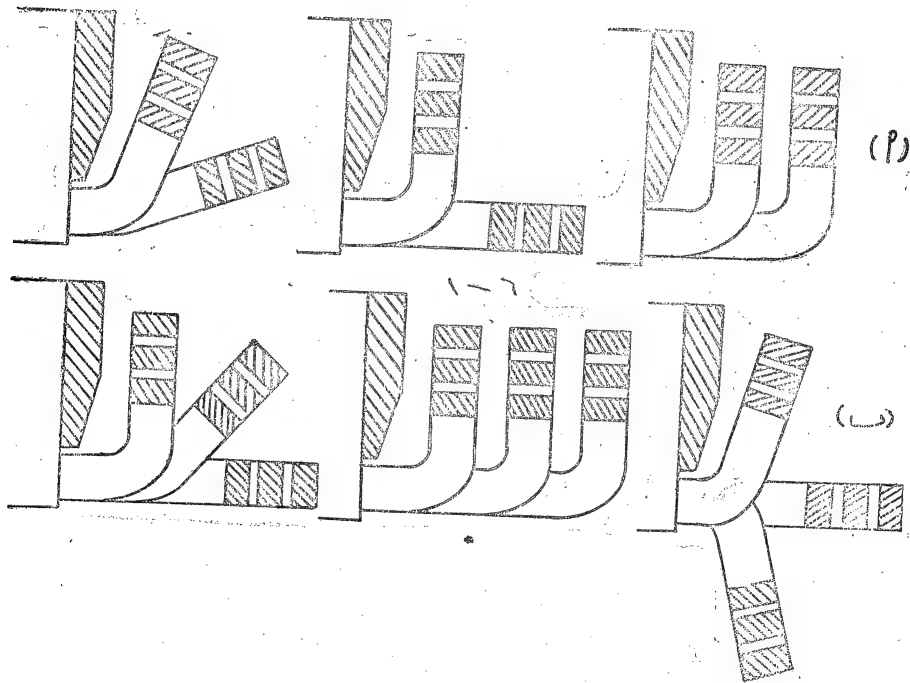
١ — الملفات المتمركزة (Concentric coils) : تكون الملفات في هذه الحالة مستطيلة الشكل ، ويكون اتساع الملف مختلفاً بالنسبة للملفات المجموعة الواحدة ، بشرط أن يكون الاتساع بالنسبة للمجموعة بأكملها هو الاتساع المطلوب (أى خطوة قطبية كاملة في الملفات كاملة الخطوة) ، هذا بينما يمكن أن يكون اتساع أى ملف في المجموعة أقل أو أكثر من الاتساع المطلوب . شكل (٥ - ١ ، أ ، ب) يبين شكل هذا النوع من الملفات . نجد في أ أن كل مجموعة من الملفات توصل على التوالي معاً ، ثم توصل بعد ذلك على التوالي مع المجموعات الأخرى ، وهذا هو النوع العادى من الملفات المتمركزة . بينما نلاحظ في ب تداخل التوصيل بين جوانب ملفات المجموعات المتتالية ، بحيث تنشطر كل مجموعة إلى اثنتين ، فنحصل



شكل (٥ - ١ ، أ ، ب)

على ضعف عدد المجموعات . ويقال إن التوصيل في هذه الحالة متركز مشطوري
(split concentric) .

لكي لا تتضارب التوصيلات المعلقة لهذه الملفات ترتب في مستويات متباعدة ،
وذلك عن طريق ثني جوانب الملفات ، بعد خروجها من المجارى ، على زوايا
مختلفة ، كما هو مبين في شكل (٦ - ١ ، ب) . ويمكن أن يتم هذا الترتيب في
مستويين كما هو مبين في الجزء أ من الشكل ، كما أننا قد نحتاج لذلك إلى ثلاث
مستويات ، كما هو مبين في الجزء ب من الشكل . ويقال في الحالة الأولى إن

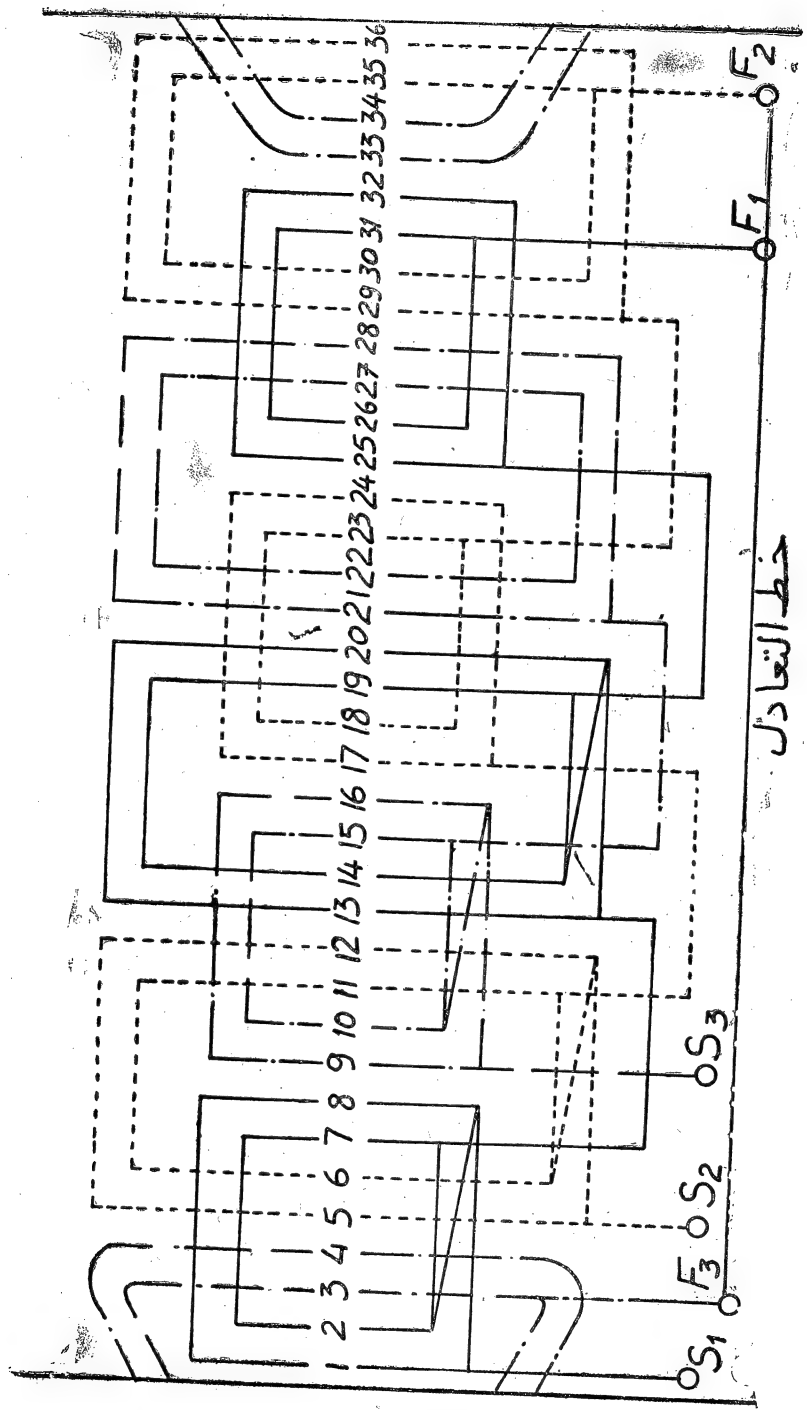


شكل (٦ - ١ ، ب)

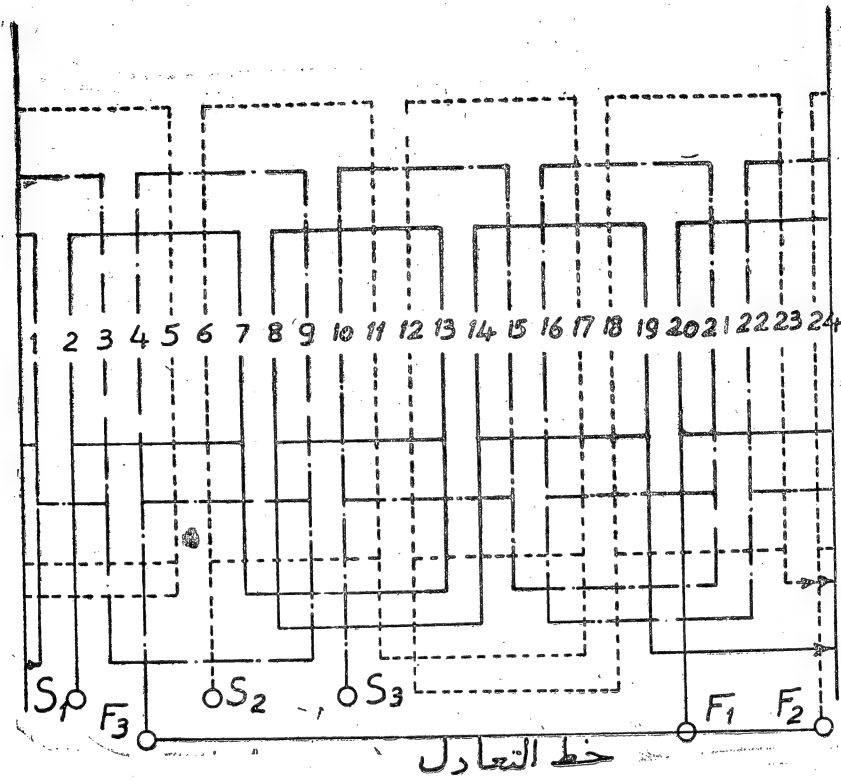
التوصيلات المعلقة للملفات مرتبة في مستويين (overhangs arranged in two planes) ، ويقال في الحالة الثانية إن التوصيلات المعلقة للملفات مرتبة في ثلاثة مستويات (Overhangs arranged in three planes) . ويتوقف تحديد عدد هذه المستويات على عدد مجموعات الملفات في كل مرحلة ، حيث يراعى عادة أن توزع مجموعات كل مرحلة بنفس الطريقة على جميع المستويات على قدر الإمكان ، وذلك لكي تصبح المراحل المختلفة متساوية في قيمة المقاومة ، وبماعة التصرب الحثية . فإذا كان عدد المجموعات في كل مرحلة زوجياً فالتناحتاج في المادة إلى مستويين فقط لترتيب التوصيلات المعلقة ، بحيث يحتل نصف المجموعات في كل مرحلة أحد المستويين ، ويحتل النصف الآخر المستوى الثاني . يبين شكل (٤ - ١) هذا النوع من الملف بالقسمة للمثال المعطى . ويمكن في غير ذلك من الحالات ترتيب التوصيلات المعلقة في ثلاثة مستويات ، كما يمكن في بعض الأحيان ، عندما يكون عدد المجموعات في المرحلة فردياً ، ترتيب المجموعات كلها إلا واحدة (العدد الزوجي) في مستويين ، ثم ترتيب نصف التوصيلات المعلقة للمجموعة الباقية في أحد المستويين والنصف لثاني في المستوى الآخر ، بحيث تأخذ هذه المجموعة شكلاً يختلف عن المجموعات الباقية لكي تفي بهذا الغرض . ويقال إن الملفات تحتوي في هذه الحالة على ملف ملتوى (cranked coil) .

ويبين شكل (٧ - ١) ملفات تحتوي على ملف ملتوى عندما يصبح عدد المجموعات فردياً . وتشبه التوصيلة المعلقة للملف الملتوى في شكلها تلك التي تكون للملفات الشبكية ، التي سيأتى ذكرها فيما بعد ، وهى المبينة في شكل (١٢ - ١) .

يبين شكل (٨ - ١) ملفات المثال المعطى عند ترتيب التوصيلات المعلقة



شکل (۷-۱)

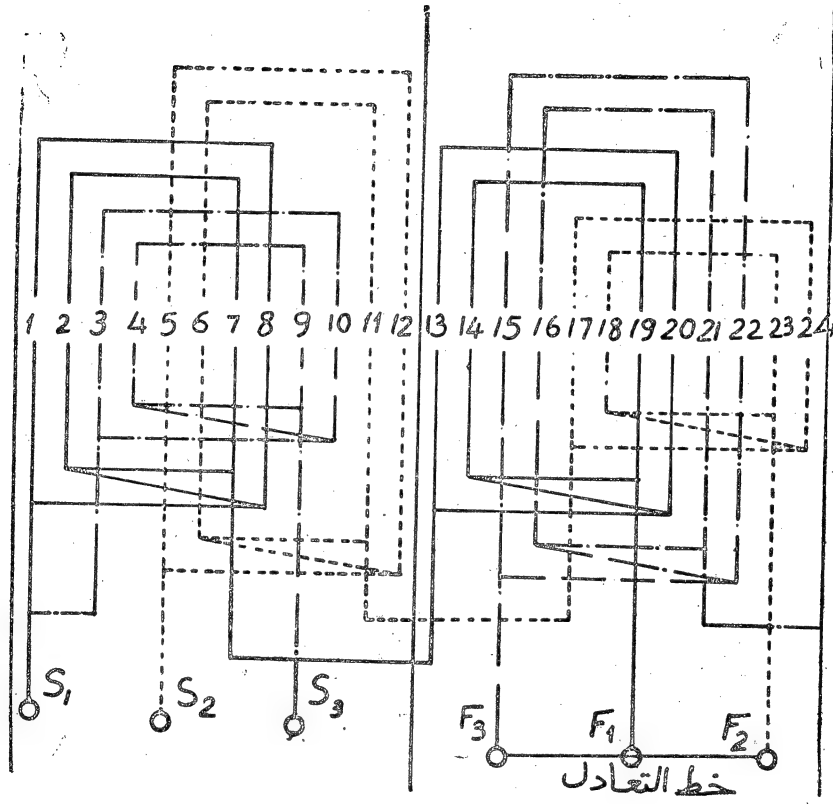


شكل (٨ - ١)

الملفات في ثلاثة مستويات . ويلاحظ أن الحاجة إلى استخدام ثلاثة مستويات قد نشأت بسبب أن الملفات أصبحت في هذه الحالة من النوع المتمركز المشطور، وأن ذلك أدى إلى استخدام ملفات ذات شكل واحد في المرحلة الواحدة .

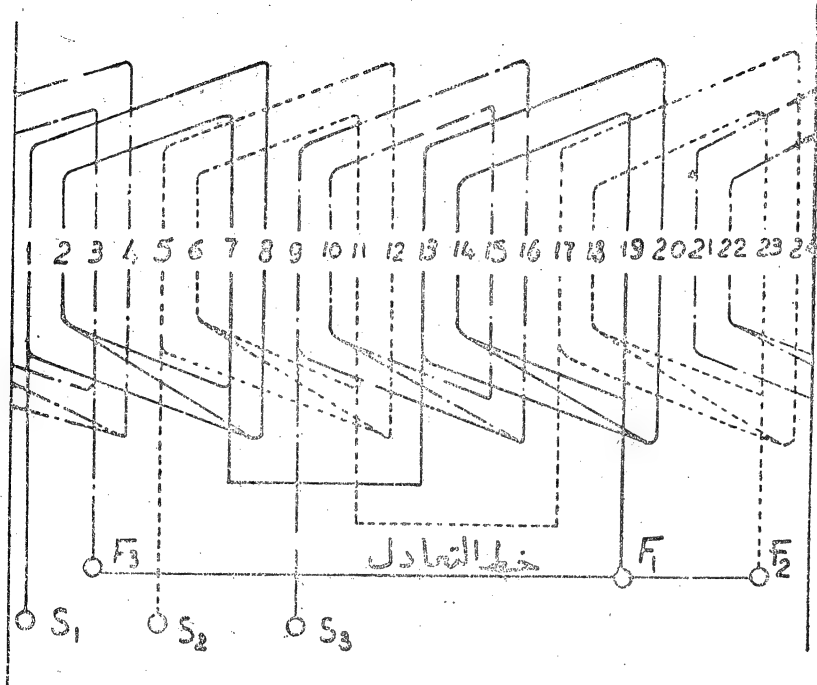
نحتاج إلى ترتيب للتوصيلات المعلقة في ثلاثة مستويات أيضا في الحالات التي يتكون فيها جسم المنتج الحديدي من نصفين متماثلين ، لكي يسهل نقلها ، حيث يركبان معا في موضع استخدام الآلة . إذ يجب أن يكون ترتيب التوصيلات المعلقة في هذه الحالة بحيث تتكون الملفات الجاهزة الصنع من مجموعتين متماثلتين تماما ، يمكن تركيب كل منها في نصف جسم المنتج على حدة ، وبحيث

لا تكون أية مجموعة من الملفات مشتركة بين النصفين ، كما هو مبين في شكل (٩-١) بالنسبة للثال المعطى .



شكل (٩-١)

يبين شكل (١٠-١) طريقة تنفيذ الالف بالنسبة للثال المعطى أيضاً، عندما تكون مجموعات الملفات جميعاً ذات شكل واحد ، فتصبح الملفات كلها في هذه الحالة من النوع للمتوى .

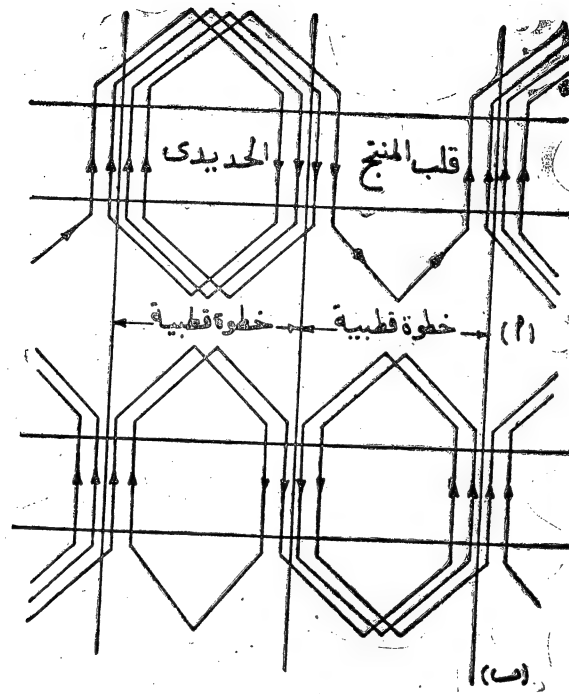


شكل (١٠-١)

٢ - الملفات الشبكية (Lattice windings) أو الماسية (Diamond)

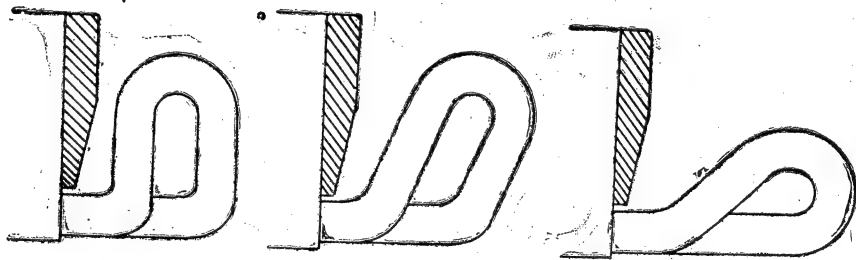
: Windings)

تأخذ هذه الملفات الشكل الماسي كما هو مبين في شكل (١-١١ أ ، ب) ،
ففي أ يوجد النوع العادي من هذه الملفات ، وفي ب النوع المشطور منها
(splitt lattice) . يلاحظ أن الملفات تكون في هذه الحالة ذات اتساع واحد
ومتماثلة في الشكل ، وهي تشبه ملفات المنتج في آلات التيار المستمر في حالة
اللف الانطباعي ، من حيث الشكل العام ، و ترتيب التوصيلات المعقدة على جانبي
المنتج . يبين شكل (١٢-١) كيف تثنى التوصيلات المعقدة بالطرق المختلفة



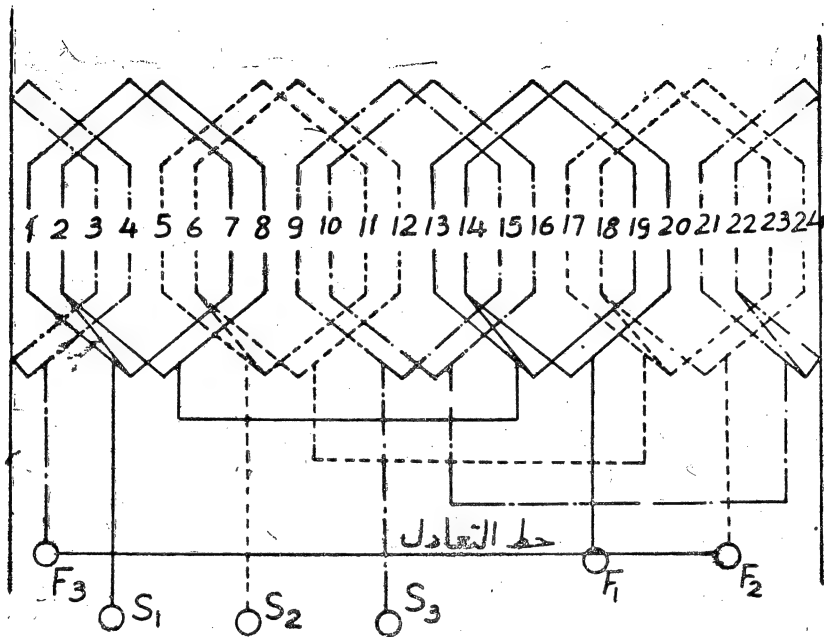
شكل (١١-أ، ب)

لتكوين رءوس الملفات، التي ترمز جنباً إلى جنب في ترتيب دائري حول محيط المنتج على الجانبين .

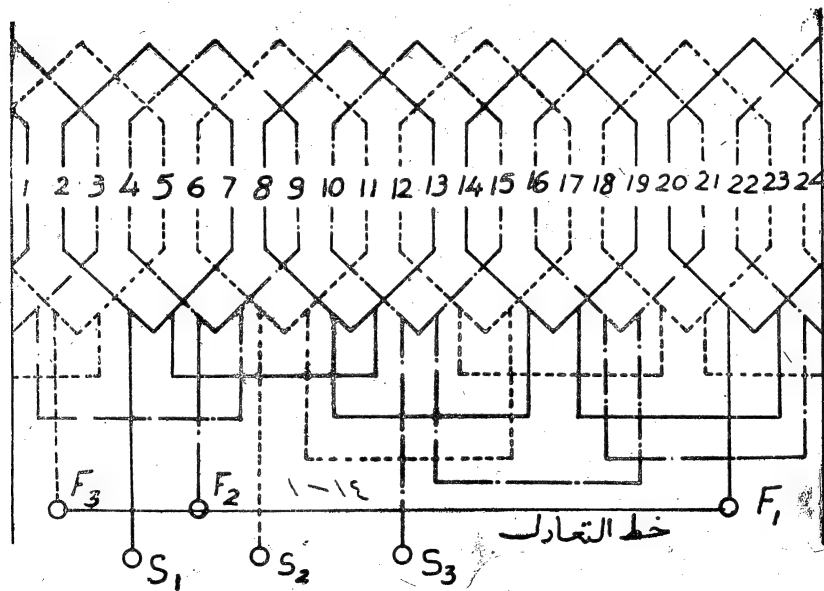


شكل (١٢-١)

يبين شكل (١٣-١) طريقة تنفيذ اللف في المثال المعطى باستخدام الملفات

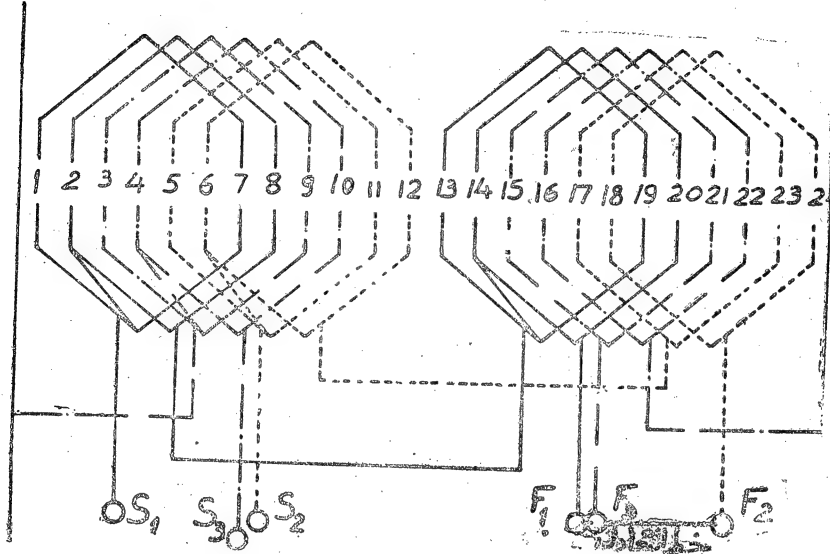


شكل (١-١٢)



شكل (١-١٤)

الشبكية العادية ، كما يبين شكل (١٤-١) كيفية استخدام الملفات الشبكية من النوع المشطور . أما شكل (١٥-١) فيبين طريقة التنفيذ لنفس المثال بنفس نوع الملفات عندما يكون الجسم المنبج مكونا من جزئين متماثلين .



شكل (١-١٥)

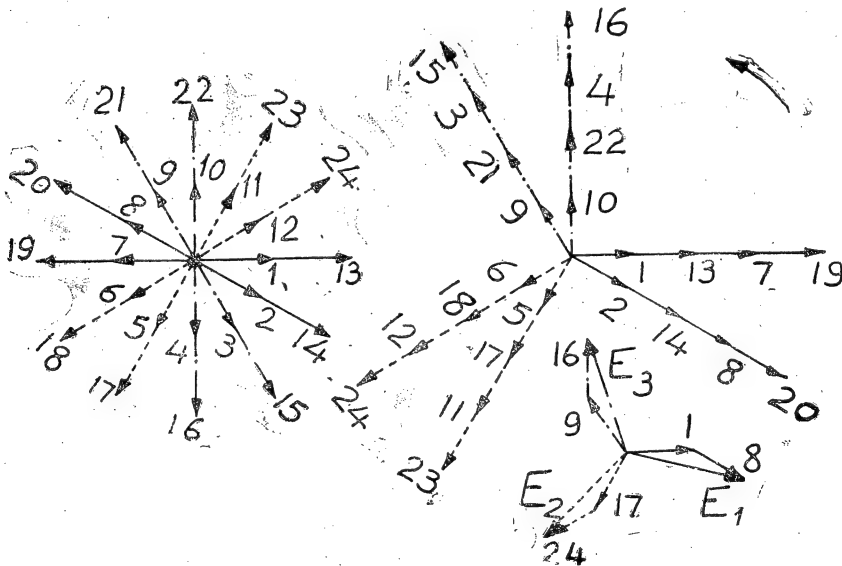
توصيل الملفات في المرحلة الواحدة على التوازي :

نحضر في بعض الحالات عندما تكون القوة الدافعة الكهربائية صغيرة والتيار كبيراً نسبياً أن تكون مسارات متوازية في كل مرحلة ، بحيث يوزع التيار المرحلي بالتساوي على هذه المسارات . ويدخل في حساب القوة الدافعة الكهربائية ، في هذه الحالة ، عدد الملفات الموجودة في الملفات الداخلة في تكوين مسار واحد من المسارات المتوازية في المرحلة الواحدة . فإذا كانت قيمة التيار المرحلي الكلي للملفات المنبج هي I_a أمبير ، وكان عدد المسارات المتوازية المطلوبة هو $2a$ لكي يتحدد التيار في المسار الواحد بالقيمة I_c أمبير ، فإن $I_c = \frac{I_a}{2a}$. ويكون هذا هو التيار المار

فى موصلات المنتج ، وهو ماتتحمله هذه الموصلات بدون تسخين زائد فى الآلة .
 وإذا كان عدد الموصلات الكلية فى مجارى المنتج هو $z = 6pq$ ، فن
 الواضح أن عدد الملفات T'_{ph} الذى يدخل فى حساب قيمة القوة الدافعة الكهربائية
 المرحلية للآلة يصبح :

$$T'_{ph} = \frac{T_{ph}}{2a} = \frac{z}{6 \times 2a} = \frac{pq}{2a} \dots\dots\dots (١-٤)$$

ويلاحظ أن الشرط الاساسى لتكوين المسارات المتوازية أن تكون القوى
 الدافعة الكهربائية المتولدة فى المسارات المتوازية للرحلة الواحدة متساوية تماما ،
 عدديا ومرحليا . وهذا يعنى أننا لانستطيع تكوين هذه المسارات إلا إذا أمكن
 تقسيم الملفات فى الرحلة الواحدة إلى مجموعات من الملفات ، بحيث تعطى المجموعة
 قوة دافعة كهربية ، تساوى القوة الدافعة الكهربائية التى تعطىها كل مجموعة من



شكل (١٦-١)

الثاني الملف (7 - 2) — المسار الثالث الملف (20 - 13) — المسار
الرابع الملف (19 - 14) .

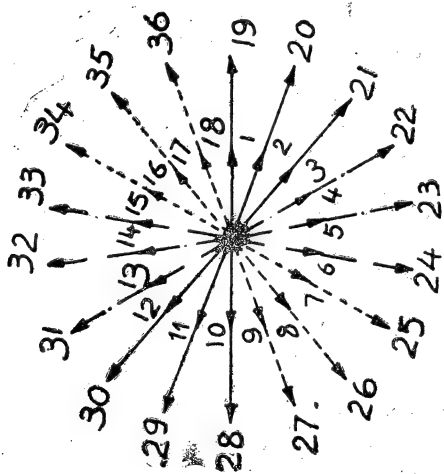
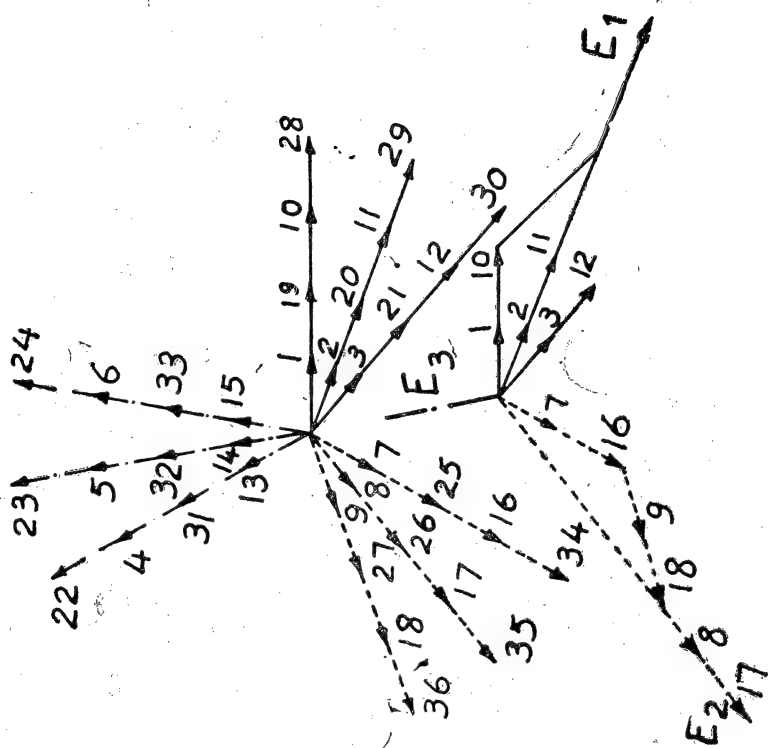
المرحلة الثانية : المسار الأول عبارة عن الملف (12 - 5) — المسار
الثاني الملف (11 - 6) — المسار الثالث الملف (24 - 17) — المسار
الرابع الملف (23 - 18) .

المرحلة الثالثة : المسار الأول عبارة عن الملف (16 - 9) — المسار
الثاني الملف (15 - 10) — المسار الثالث الملف (4 - 21) — المسار
الرابع الملف (3 - 22) ،

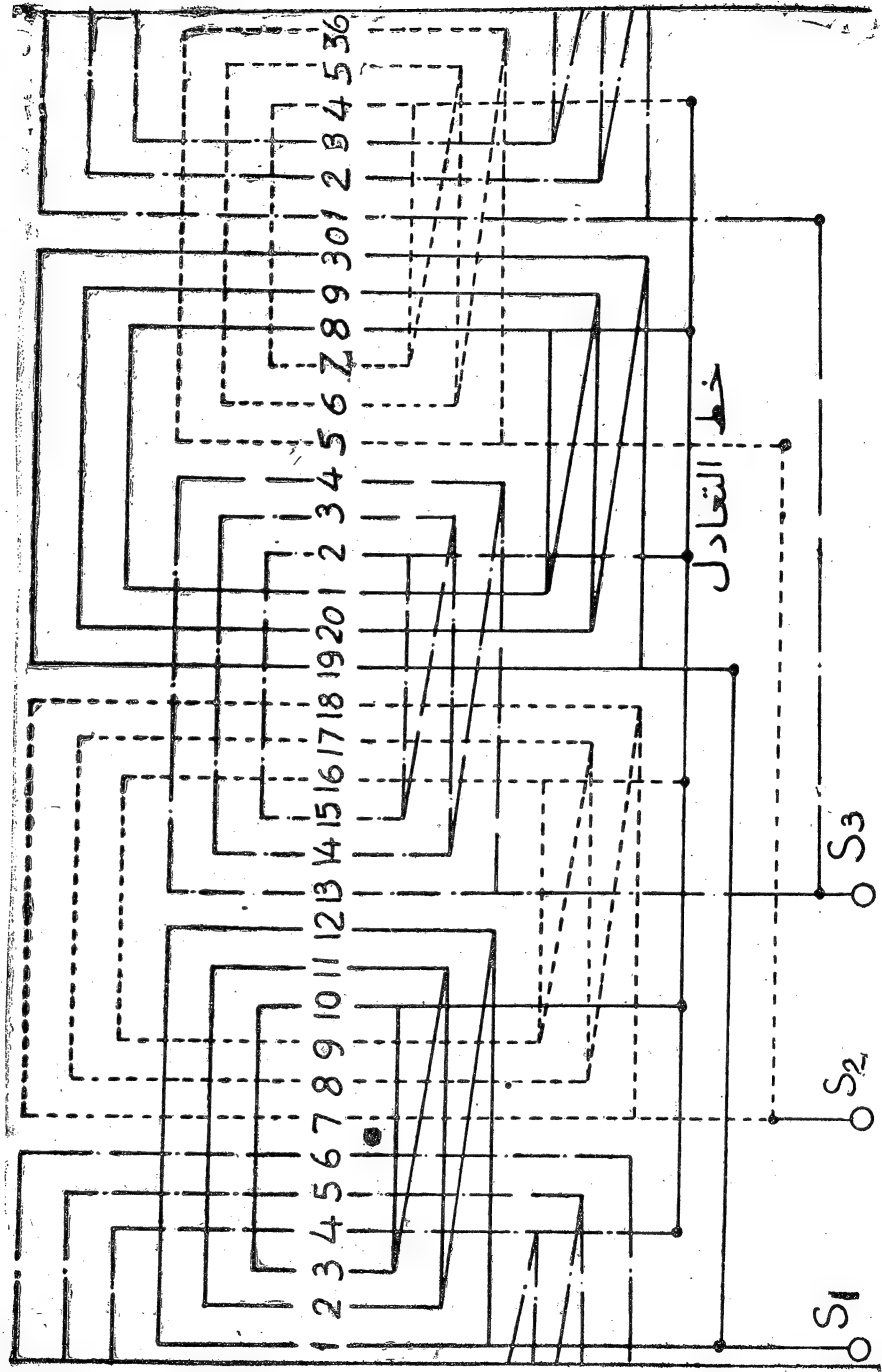
ويتضح من شكل (١٦ - ١) أن القوة الدافعة الكهربائية التي يعطيها
المسار تساوي القوة الدافعة الكهربائية التي يعطيها كل من المسارات الأخرى في
نفس المجموعة وتنطبق معها مرحليا ، لذلك فأننا نحصل على القوة الدافعة الكهربيه
المرحلية بتحديد القوة الدافعة الكهربائية التي يعطيها أحد المسارات في المرحلة .

إذا كانت $q = 3$ بدلا من $q = 2$ مع نفس عدد الاقطاب ، بمعنى أن
عدد المجارى الكلى أصبح 36 بدلا من 24 ، نجد بمراجعة مخطط نجمة المجارى
أننا لا نستطيع تكوين أربعة مسارات متوازيه في كل مرحلة في الآلة ، ولكن
يمكن في هذه الحالة تكوين مسارين متوازيين فقط في كل مرحلة ، كما يتضح من
شكلي (١٧ - ١ ، ب) . ويلاحظ أن الآله في هذه الحالة تنقسم إلى آلتين
متماثلتين تماما ، كل منهما ذات قطبين وتحتوى على 18 مجرى ، كما تمثل المرحلة
الواحدة في كل من هاتين الآلتين مساراً من المسارين المتوازيين في المرحلة
المنظرة في الآلة الأصلية .

1 1 1



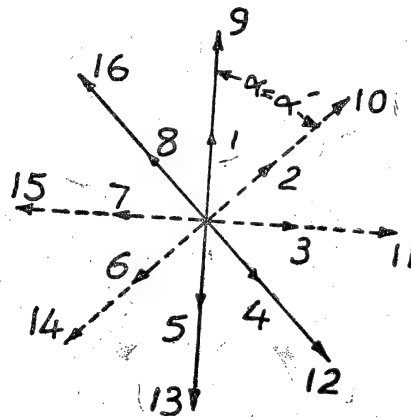
(1 1 1) 1



شكل (١١-١٢) (٢-١)

الملفات ثنائية المراحل (Two phase windings) :

في المولدات ثنائية المراحل (Two phase generators) توجد مرحلتان فقط . لذلك تقسم مجارى المنتج على أساس وجود مرحلتين من الملفات فقط ، يفصل بينهما 90 درجة كهربية ، أى أنها متعامدتان . فإذا كانت $q = 2$ فى هذه الحالة أيضا ، فمعنى هذا أن عدد المجارى الكلى على سطح المنتج يصبح $s = 2p \times 2q$ أى $4pq$ وهو يساوى 16 إذا كان عدد الأقطاب أربعة . فإذا كان اللف أحادى الطبقة ، فإن هذا يعنى وجود 16 جانب من جوانب الملفات يخص كل مرحلة منها ثمانية ، أى أن عدد الملفات فى المرحلة هو أربعة .



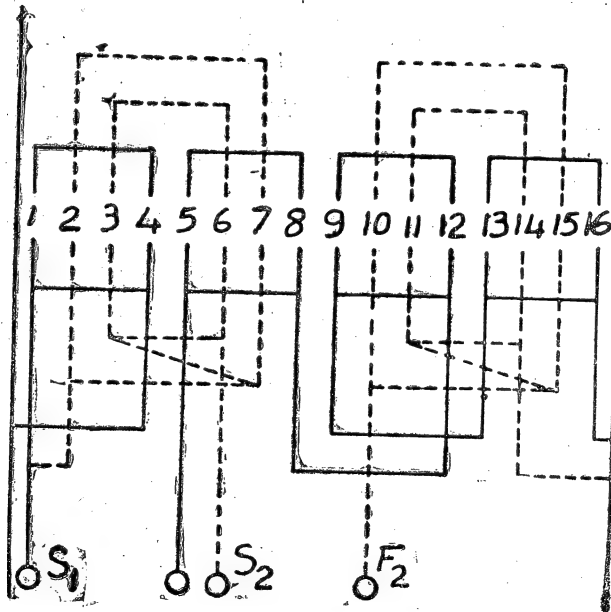
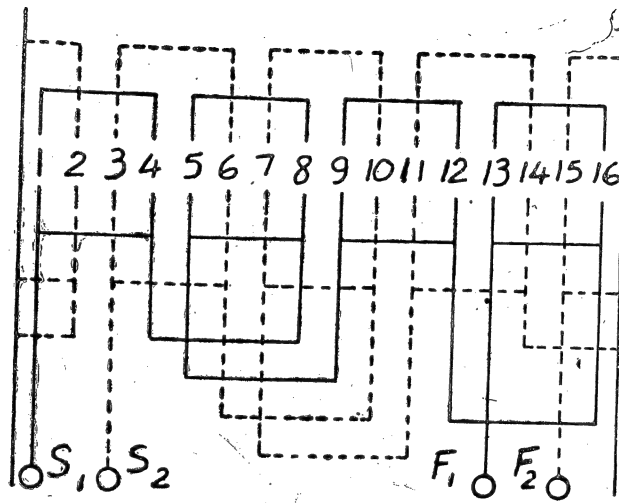
شكل (١٨ - ١)

ونستعين عند تنفيذ اللف فى هذه الحالة أيضا بمخطط نجمة المجارى الذى نرسمه باتباع نفس الخطوات التى اتبعناها فى حالة الملفات ثلاثية المراحل ، وذلك على النحو التالى : حيث أن $q = 2$ فإن هذا يعنى وجود مجرىين لكل مرحلة تحت كل قطب ، وتمثل القوة الدافعة الكهربائية المتولدة فى جانب الملف فى المجرى بنتجه فى مخطط نجمة المجارى . وتكون قيمة كل من α و α' فى هذه الحالة عبارة

عن :

$$\alpha' = \frac{360 F}{S} = \frac{360 \times 2}{16} = 45^\circ$$

$$\alpha = \frac{360 p}{S} = \frac{360 \times 2}{16} = 45^\circ$$



شکل (١٨-١) (١٤-١٨)

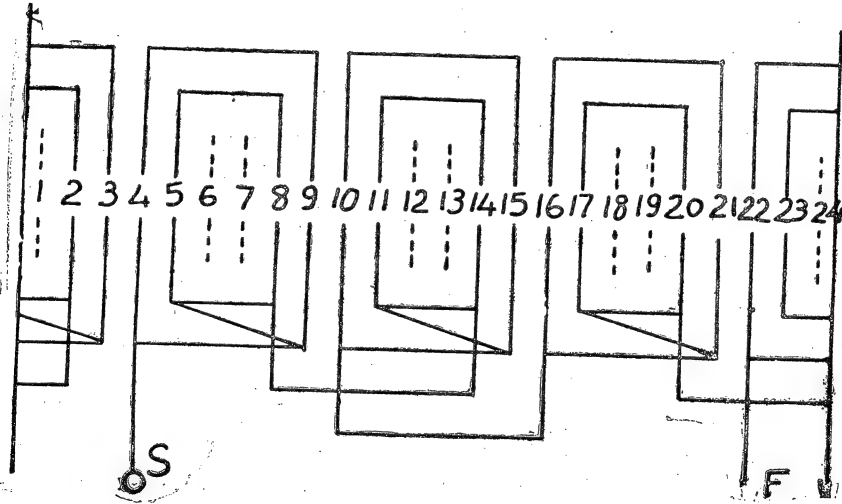
يبين شكل (١٨-١) مخطط نجمة المجارى وشكل (١٨-١ ب) الملفات بعد توصيلها، بالإستعانة بمخطط نجمة المجارى، بحيث يتكون كل ملف من جانبين، تختلف القوة الدافعة الكهربائية المتولدة فيها مرحليا بزاوية أقرب ما يمكن إلى 180 درجة. هذا وتكون المتجهات الممثلة لجوانب الملفات في إحدى المرحلتين متعامدة على المتجهات المناظرة الممثلة لجوانب الملفات في المرحلة الأخرى. كما يفصل بين بدائتي المرحلتين زاوية مرحلية مقدارها 90 درجة كهربية. يبين شكل (١٨-١ ب) توصيل الملفات بالطريقة التي تسمح باستخدام منتج منقسم إلى جزئين، حتى يمكن تجميعه عند مكان التشغيل، مع استخدام ملفات جاهزة.

الملفات احادية المراحل (Single phase winding) :

عند تصميم الملفات الخاصة بمولدات التيار المتردد (أو المحركات) أحادية المراحل يراعى عدم توزيع الملفات على جميع مجارى المنتج، بحيث تتسلا الموصلات ثلثي هذه المجارى فقط. فقد وجد، كما سوف يوضح بالبرهان فيما بعد، أن الزيادة المكنسية في قيمة القوة الدافعة للكهربية للآلة نتيجة لملء ثلث المجارى الباقى بالموصلات، لا توازى ثمن النحاس والمجهود الذى يبذل فى اعداد هذه الموصلات. لذلك جرت العادة على ترك ثلث عدد المجارى خاليا فى مثل هذه المولدات.

نستخدم عند عمل التوصيلات الخاصة بالملفات فى مولد التيار المتردد أحادى المراحل مخطط نجمة المجارى، مرسوما على أساس أن المولد ثلاثى المراحل فى البداية. ثم نختار ثلثي المتجهات بشرط أن يكون كل ثلث منها مجموعة، يكون كل متجه فيها مختلفا عن متجه مناظر فى المجموعة الأخرى بزاوية مرحلية أقرب ما تكون إلى 180°، وذلك حتى يمكن تكوين ملف من مثل هذين المتجهين.

وعند توصيل الملفات على التوالي بعد ذلك معا يراعى ، كما فعلنا فى جميع الحالات السابقة ، أن يكون اتجاه القوة الدافعة الكهربائية فى جانبى الملفين الموصلين معا متضادين . فإذا أردنا لف منتج المولد ذى الأربعة وعشرين مجرى السابق ، بملفات أحادية المراحل ، يمكننا الاستعانة بمخطط نجمة المجارى الوارد فى شكل (٣-١) الخاص بالآلة عندما أردنا لفها بملفات ثلاثية المراحل . ثم نختار مجموعتين من المنتجات تحتوى كل منها على ثلث عدد المنتجات ، أى ثمانية ، ويكون كل متجه فى المجموعة الأولى على زاوية أقرب ما تكون إلى 180° من أحد المنتجات فى المجموعة الثانية . فإذا كانت المجموعة الأولى تحتوى على المنتجات 2 , 3 , 4 , 5 , 14 , 15 , 16 , 17 نجد أن المجموعة الثانية تحتوى على المنتجات 8 , 9 , 10 , 11 , 20 , 21 , 22 , 23 ، وهذا يعنى أننا سوف نترك المجارى 1 , 6 , 7 , 12 , 13 , 18 , 19 , 24 خالية بدون ملفات .



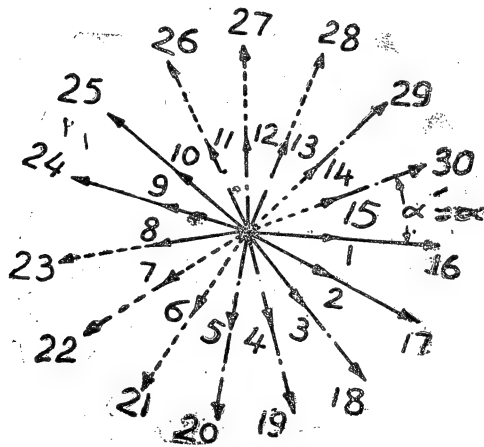
شكل (١٩-١)

يبين شكل (١٩-١) كيفية توصيل الملفات على أساس اتباع القواعد السابقة

الملفات كسرية المجرى (Fractional slot windings) :

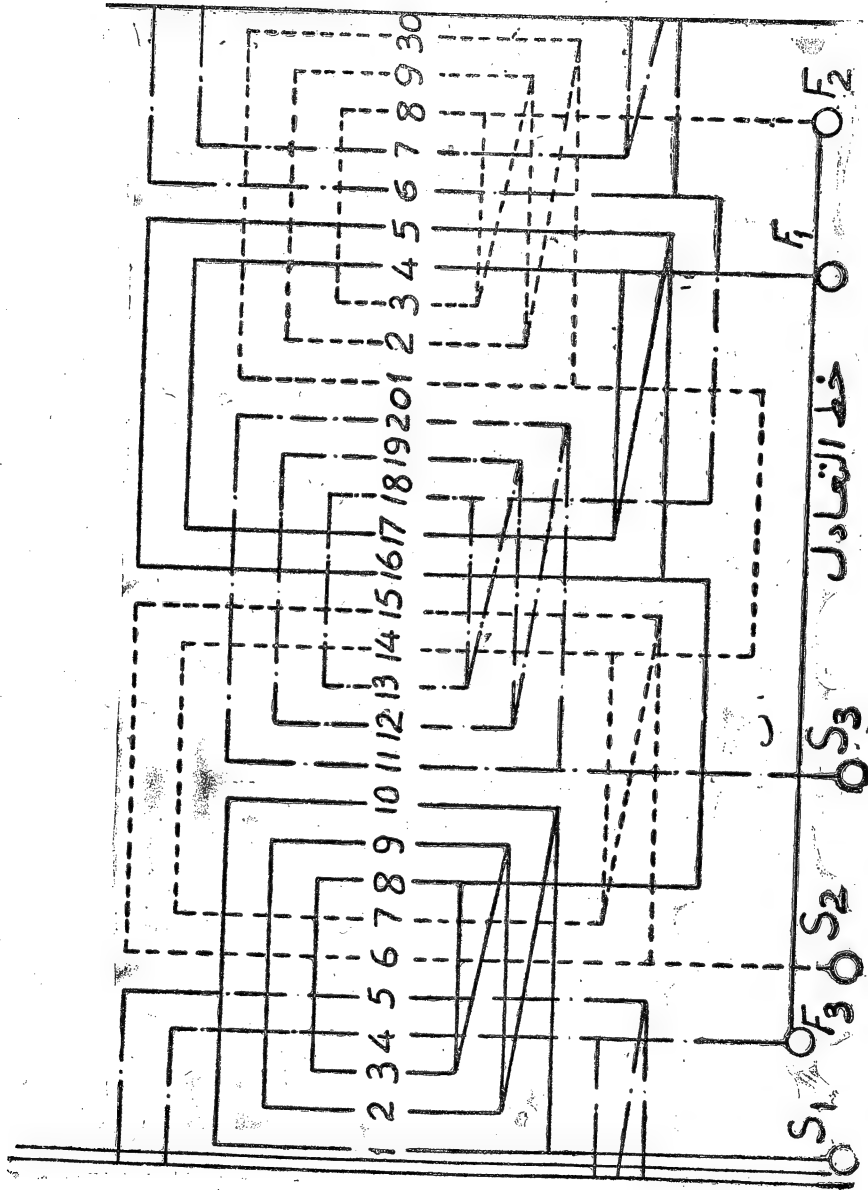
عندما تكون قيمة q فى الآلة كسراً أو عدداً كسرياً يقال إن الملفات كسرية المجرى . ولا تختلف طريقة تنفيذ الملفات فى هذه الحالة عن الطرق التى اتبعناها فى الأحوال السابقة ، غاية ما فى الأمر أنه يجب توافر شرطان أساسيان حتى يمكن تنفيذ الملف على النحو الصحيح :

١ - يجب أن يكون عدد أزواج الأقطاب p مساوياً أو مكرراً صحيحاً لمقام الكسر فى q . فإذا كانت $q = 2\frac{1}{2}$ ، فإن p يجب أن تساوى 2 أو أحد مضاعفاتهما ، وإذا كانت $q = 1\frac{1}{2}$ ، فإن p يجب أن تساوى 4 أو أحد مضاعفاتهما ، وهكذا . يبين شكل (٢٠ - ١) طريقة عمل التوصيلات فى ملفات آلة تحتوى على 30 مجرى وعدد أقطابها 4 أى أن $q = 2\frac{1}{2}$ ، ويلاحظ فى هذه الحالة أن عدد الملفات يختلف فى مجموعات الملفات من اثنين إلى ثلاثة ، نتيجة لتغير عدد المجارى الخاصة بالمرحلة من اثنين تحت أحد الأقطاب إلى ثلاثة تحت القطب الآخر ، حتى تصبح $q = 2\frac{1}{2}$ فى المتوسط . كما يلاحظ ترتيب الأعداد المختلفة للمجارى تحت



شكل (٢٠ - ١)

الانقطاع المتجاورة ، بحيث يمكن تكوين مجموعات الملفات بعدد من الجوانب المتساوية . ومن هنا تظهر أهمية الشرط المفروض . هذا وقد تم عمل التوصيلات



شكل (٢٠ - ١ ب)

المبينة في الشكل بمساعدة مخطط نجمة المجارى المبين في شكل (٢٠-١) ،
 باستخدام نفس القواعد السابق شرحها ، حيث نجد أن $\alpha' = \alpha = 24^\circ$ في
 هذه الحالة .

٢ — من الواضح أنه يجب أن تبدأ المراحل التالية في مجارى يفصل بينها
 زاوية مقدارها $\frac{360}{m}$ درجة كهرية ، حيث m هي عدد المراحل (نعتبر في
 حالة الملفات ثنائية المراحل أن $m=4$ لأن الزاوية بين المرحلتين 90° كهرية) ،
 ونظراً لأن α' هي الزاوية بين كل مجريين متتاليين فإن $\frac{360}{m}$ يجب أن تكون
 مكرراً صحيحاً للزاوية α' . فإذا كانت g عدداً صحيحاً موجباً نجد أن :

$$g \alpha' = \frac{360}{m} = g \frac{360 F}{S}$$

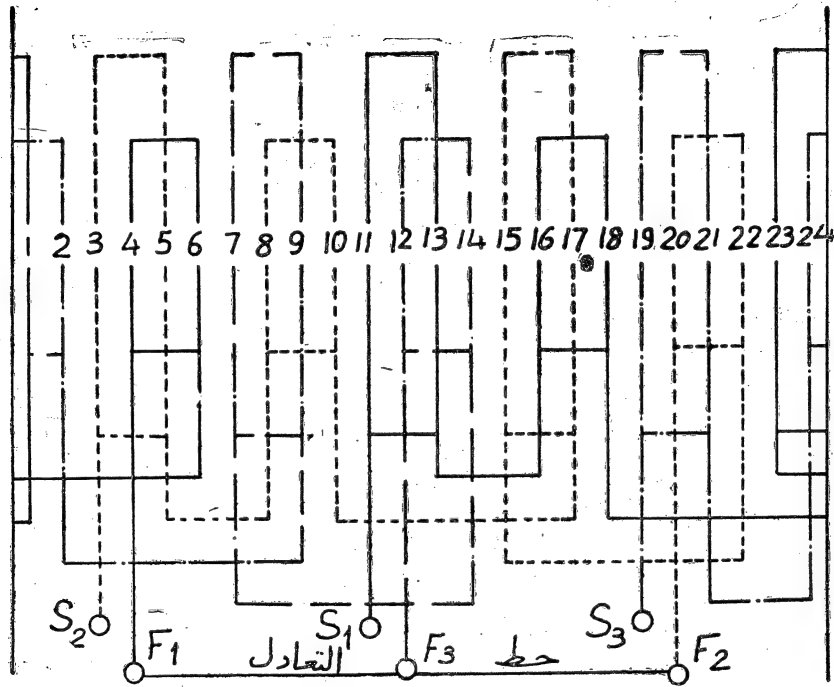
$$\therefore \frac{S}{Fm} = g = \text{عدد صحيح موجب}$$

هذا هو الشرط الثانى الواجب توافره . وفي المثال المعطى في 1 نجد أن
 $g = 5$.

مثال آخر للملفات كسرية المجرى هو ذلك الذى ورد في أول الباب ، والمبين
 بمخطط نجمة المجارى له في شكل (٢-١) ، حيث وجدنا أن $q = \frac{4}{5}$ وأن
 $\alpha' = 15^\circ$. بالاستعانة بمخطط نجمة المجارى هذا ، وتطبيق القواعد الخاصة
 بالملفات كسرية المجرى ، يمكن تنفيذ الف على النمط المبين في شكل (٢٠-١) .
 وفي هذه الحالة نجد أن قيمة g تصبح :

$$g = \frac{24}{1 \times 3} = 8$$

ومعنى هذا أن عدد المجارى التى تفصل بين بدايات المراحل يساوى 8 أيضاً



شكل (٢٠ - ٢١)

ثانياً - الملفات مزدوجة الطبقة (Double layer Windings) :

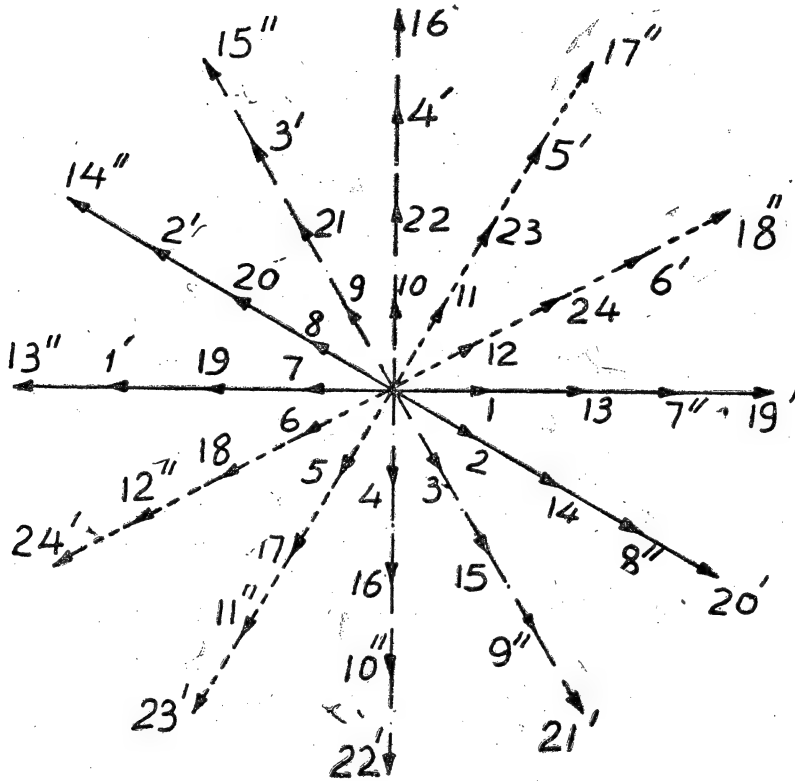
يحتوى المجرى فى هذا النوع من الملفات على طبقتين معزولتين عن بعضهما البعض عزلاً تاماً . ويوجد فى كل طبقة جانب واحد من جوانب الملفات ، وهذا هو ما يميز هذا النوع من ملفات منتج آلات التيار المتردد عن ملفات منتج آلات التيار المستمر ، التى يمكن أن تحتوى الطبقة الواحدة فى المجرى فيها أكثر من جانب واحد من جوانب الملفات . لذلك نجد أن عدد الملفات فى هذه الحالة يساوى عدد المجارى . وعدد جوانب الملفات ضعف هذا العدد الأخير . ويراعى كما هو الحال فى آلات التيار المستمر أن يشغل أحد جانبي الملف الواحد الطبقة

العلوية (upper layer) في مجرى - (ناحية الشفرة الهوائية) بينما يشغل جانبه الآخر الطبقة السفلى (bottom layer) في مجرى آخر (ناحية القلب الحديدي) . وتحدد المسافة بين الجانبين على سطح المنتج بانساع الملف (coil span) ، أو خطوة اللف (Winding pitch) ، وذلك بما تساويه هذه المسافة مقاسة بعدد المجارى التى تشملها . وهى تساوى خطوة قطبية فى حالة الملفات كاملة الخطوة ، وأقل أو أكثر قليلا من الخطوة القطبية فى حالة الملفات كسرية الخطوة تماما كما حدث مع الملفات أحادية الطبقة . ويمكن أن يخص كل مرحلة عدد أصحيا من المجارى تحت كل قطب ، كما يمكن أن يكون هذا العدد كسريا ، فنحصل على ملفات كسرية المجرى ، كما كان الأمر بالنسبة للملفات أحادية الطبقة .

عند عمل التوصيلات الخاصة بالملفات نستعين بمخطط نجمة جوانب الملفات (coil sides star diagram) الذى يرسم على نمط مخطط نجمة المجارى السابق شرحه فى حالة الملفات أحادية الطبقة ، وذلك على النحو التالى :

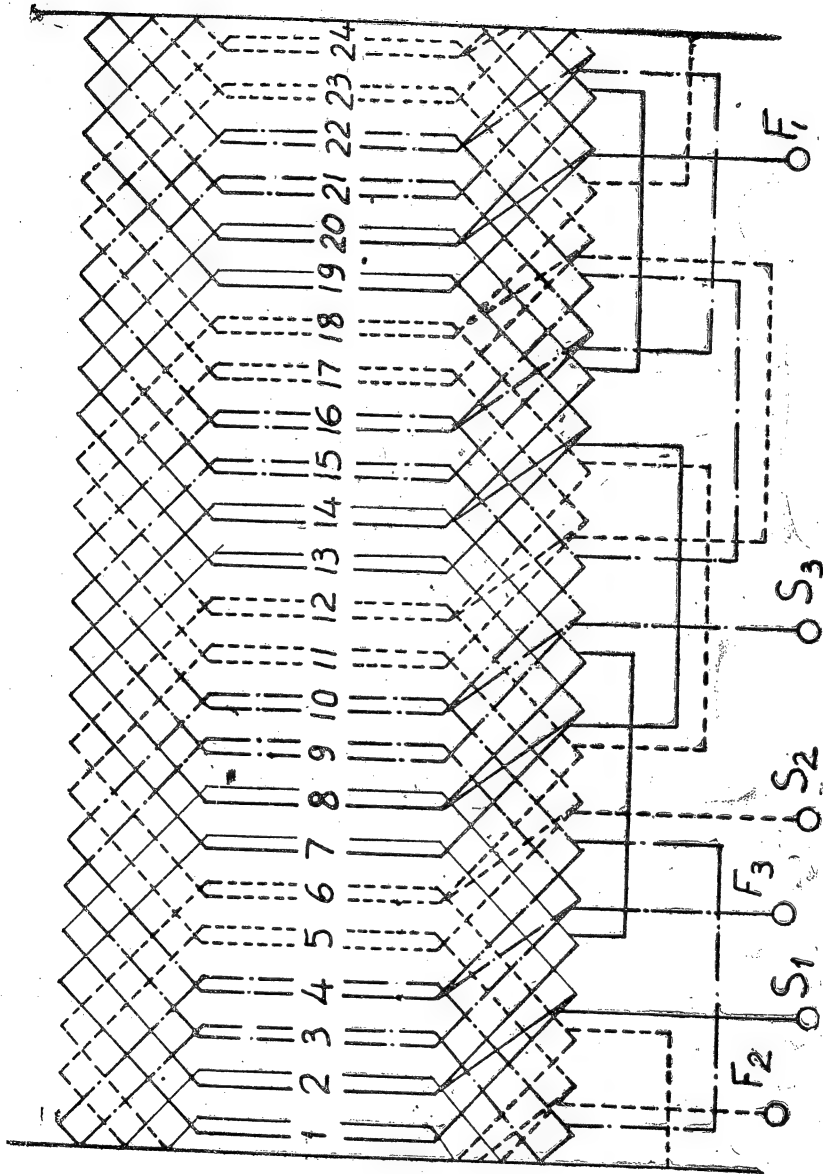
بالنسبة لجوانب الملفات التى تشغل الطبقات العلوية فى المجرى يرسم المخطط بنفس الطريقة التى اتبعناها فى رسم مخطط نجمة المجارى تماما . غاية ما فى الأمر أن الأرقام المعطاه للمتجهات سوف تدل فى هذه الحالة على هذه الجوانب للملفات أساسا ، بالإضافة إلى أن كل رقم سوف يعطى أيضا رقم المجرى الذى يحتل جانب الملف الطبقة العليا فيه . ترسم المتجهات الخاصة بجوانب الملفات التى تشغل الطبقات السفلية فى المجارى بنفس الطريقة على نفس المخطط ، لإبتداء من نهايات المتجهات السابقة ، مع تحديد الجانب السفلى للملف الأول بناء على قيمة اتساع الملف بالمجارى ، ولإعطائه الرقم 1' . تعطى الجوانب السفلية للملفات نفس الأرقام التى أعطيت للجوانب العلوية ، مع تمييزها بشرطة أو شرطين أو ثلاث ... إلخ ، على

العدد . ويكون التمييز بشرطة واحدة ، أو اثنتين أو ثلاثة ... إلخ ، على حسب ما إذا كان المتجه الخاص بالجانب العلوى للملف الواقع في نفس المجرى قد جاء في الدورة الأولى ، أو الثانية أو الثالثة ... إلخ ، في بداية الرسم .



شكل (٢١ - ١١)

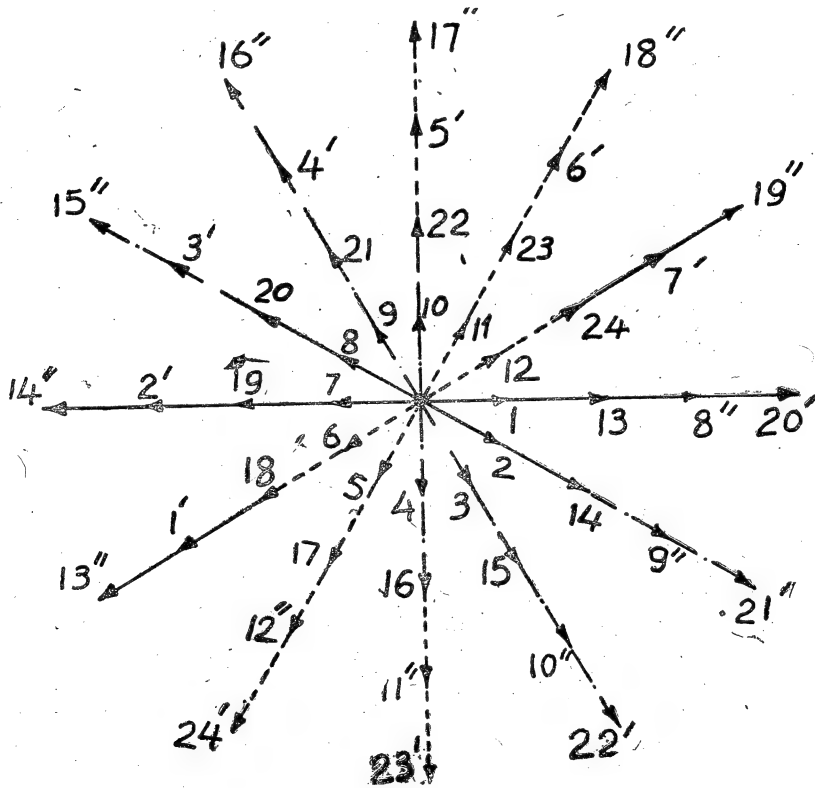
عند توصيل مجموعات الملفات معاً تتبع نفس القاعدة السابقة ذكرها من حيث أن عمل التوصيل يجب أن يكون دائماً بين جانبي ملفان يولدان قوتين دافعتين كهربيتين متضادتين في الاتجاه ، كما أن تحديد بدايات المراحل يكون بنفس الأسلوب وباتباع نفس القواعد المعطاة سابقاً . كما يجب في هذه الحالة أيضاً مراعاة الشروط الخاصة بإمكان تنفيذ الملف عند عمل ملفات كسرية المجرى،



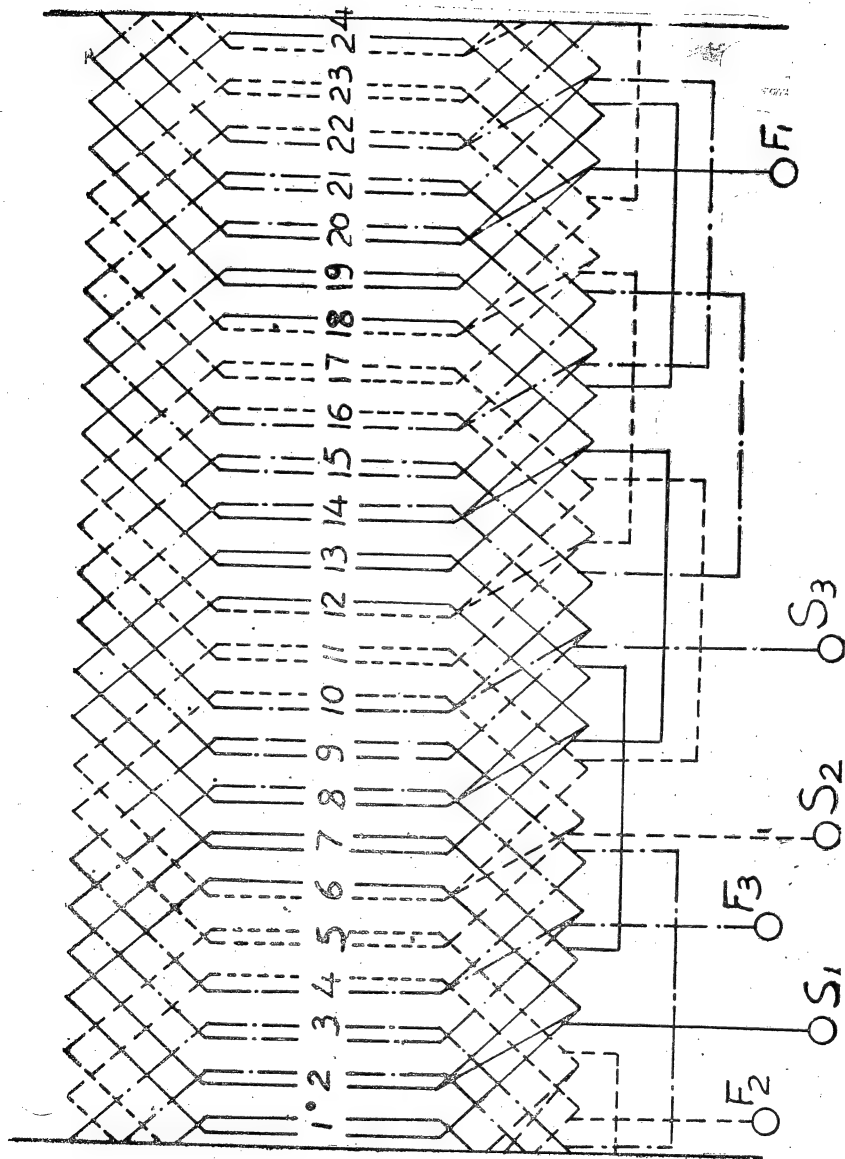
شکل (٢١ - ٥١)

مع فارق واحد ، وهو أن اتساع الملف في حالة الملفات أحادية الطبقة يتحدد تلقائياً على أساس توافر الشروط المطلوبة ، بينما يمكن بعد توافر هذه الشروط في حالة الملفات ثنائية الطبقة اختيار اتساع الملف كما نريد .

يبين شكل (٢١ - ١) مخطط جوانب الملفات وشكل (٢١ - ١ ب) طريقة تنفيذ هذه الملفات في آلة تيار متردد ذات أربعة أقطاب ، ويحتوى منتجها على 24 بحرى ، وذلك عندما يكون الملف مزدوج الطبقة ، ويكون اتساع الملف خطوة قطبية كاملة ، بينما يبين شكلاً (٢٢ - ١ ، ب) حل نفس المسألة عندما يكون



شكل (٢٢ - ١)



مکرم (٢٢-٢١)

اتساع الملف خمسة أسداس الخطوط القطبية . وفي كلا الحالتين نجد أن :

$$\alpha = \alpha' = \frac{360}{S} F = 30^\circ \text{ درجة كهرية}$$

نبدأ بعد ذلك في رسم مخطط جوانب الملفات لكل حالة للاستعانة به بعد ذلك في عمل التوصيلات المختلفة للملفات . ويكون رسم مخطط جوانب الملفات العلوية في الحالتين على نمط مخطط نجمة المجارى في الامثلة السابقة ، حيث نحصل على دورتين من المتجهات (يكون عدد دورات المتجهات مساويا F حيث يقع في كل دورة $\frac{S}{F}$ من المتجهات ، التي يفصل بين كل اثنين متتاليين منها الزاوية α') . تعطى دورة المتجهات الاولى الأرقام من 1 إلى 12 وتعطى الدورة الثانية الأرقام من 13 إلى 24 . وتشير هذه الأرقام إلى ترتيب المجارى جنبا إلى جنب ، كما أنها تدل في الوقت نفسه على أرقام جوانب الملفات التي تحتل الطبقة العلوية لهذه المجارى ، كما سبق شرحه .

عند رسم المتجهات الخاصة بالقوى الدافعة الكهرية ، التي تتولد في الجوانب السفلية للملفات ، يجب أولا تحديد اتساع الملف بعدد المجارى التي يحتوى عليها ، وهو ستة في الحالة الاولى وخمسة في الحالة الثانية . معنى هذا أن الجانب السفلي للملف الاول يقع في المجرى رقم 7 بالنسبة للحالة الاولى وفي المجرى رقم 6 بالنسبة للحالة الثانية . وبناء على ذلك نرسم المتجه $1'$ ، الخاص بالجانب السفلي للملف رقم 1 في مخطط متجهات جوانب الملفات ، على امتداد المتجه رقم 7 في الحالة الاولى ، وعلى امتداد المتجه رقم 6 في الحالة الثانية . يلي ذلك المتجهات $2'$ ، $3'$ ، $4'$... ألخ على زوايا α من بعضها البعض . عندما نصل إلى المتجه الخاص بالجانب السفلي للملف رقم 7 في الحالة الاولى ، والخاص بالجانب السفلي للملف رقم 8 في الحالة الثانية ، نجد أننا وصلنا إلى المجرى رقم 13 ، وهو واقع

في الدورة الثانية، بالنسبة للمتجهات الخاصة بجوانب الملفات العلوية السابق سُمها .
لذلك تميز هذه الأرقام بوضع شرطتين فوقها بدلا من شرطة واحدة ، كما سبق
الإشارة إليه ، فتصبح 7" في الحالة الأولى ، 8" في الحالة الثانية . ونستمر على هذا
المخوال .

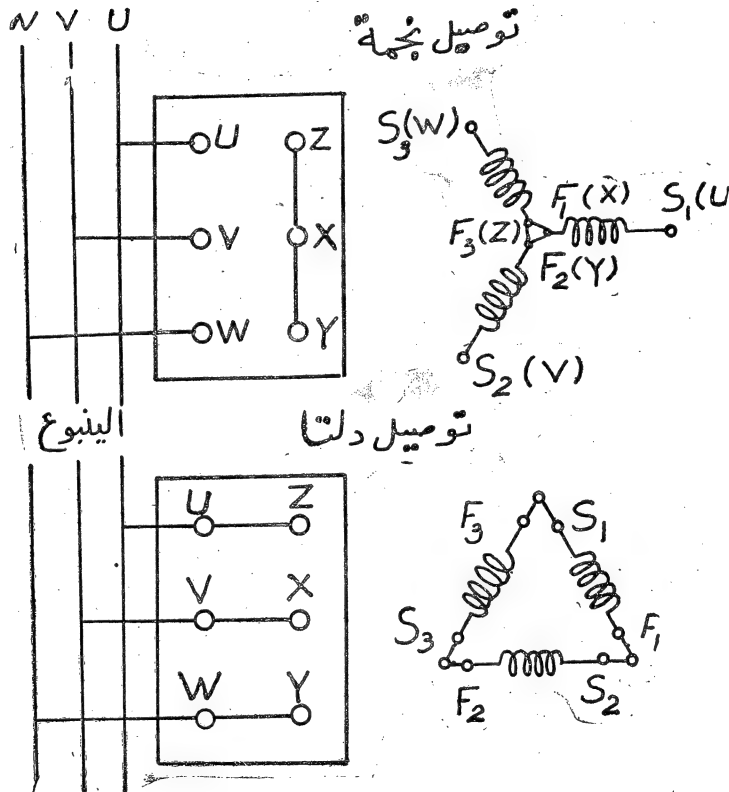
الاستخدامات المختلفة لأنواع الملفات :

يؤدي استخدام الملفات كسرية المجرى في الآلات المتزامنة إلى تحسين شكل
منحنى الضغط ، بما يعنى اقترابه من الشكل الجيبي المطلوب في هذه الحالة ، وذلك
عندما يكون شكل منحنى كثافة الخطوط المغناطيسية أقرب ما يكون إلى الشكل
الجيبي . كما ينتج عن تقصير اتساع الملف بنسبة معينة إلى حذف توافقيات من
منحنى الضغط تتوقف درجتها على قيمة هذه النسبة . ونظراً لأنه يمكن التوفيق
بين هذين الأمرين معاً في حالة الملفات ثنائية الطبقة ، فإن الغالب هو استعمال
هذا النوع من الملفات في الآلات المتزامنة ، للحصول على منحنى ضغط أقرب
ما يكون إلى الشكل الجيبي . أما في حالة الملفات أحادية الطبقة فإن استخدام قيمة
كسرية معينة لـ q يؤدي إلى تحديد اتساع معين للملف ، بخطوة كسرية تختلف عن
الخطوة القطبية اختلافاً صغيراً ، أما في حالة المحركات النائية فلا يصح عادة
استخدام ملفات كسرية المجرى ، إذ ينشأ عنها بعض المتاعب في التشغيل ، مثل
إصدار الطنين ، أو تولد توافقيات في منحنى عزم الدوران ، ينتج عنها تغيرات
جوهريّة في سرعة دوران المحرك ، تجعلها تختلف اختلافاً بيناً عن السرعة المطلوبة .
وقد تستخدم الملفات أحادية الطبقة ، كما تستخدم الملفات ثنائية الطبقة في هذا
النوع من الآلات ، دون تمييز بين الحالتين ، إلا على حسب ما تقتضيه ظروف
التصميم .

وهناك نوع واحد من المحركات التأثيرية ، التي تضطر إلى إستخدام الملفات كسرية المجرى فيها . وهى المحركات ذات الملفات متعددة الاقطاب ، التي نحصل منها على سرعات تزامن مختلفة بتغيير توصيلات الملفات .

توصيل اطراف المراحل المختلفة الى صندوق النهايات (Terminal Box)

يحتوى صندوق النهايات فى الآلة على ستة أطراف ، تستخدم لتوصيل الآلة إلى الينبوع الكهربائى ثلاثى المراحل ، اى تغذيته بالقدرة الكهربائية ، إذا كانت الآلة مولداً ، أو تأخذ منه القدرة الكهربائية ، إذا كانت الآلة محركاً .



شكل (٢٣-١)

يبين شكل (٢٣-١) كيفية ترتيب الاطراف الستة في صندوق النهايات ، حتى يمكن توصيل الآلة عن طريقه على شكل دلتا أو نجمة ، بحيث تراعى البساطة في إجراء التوصيلات تفاديا لحدوث الاخطاء . هذا ويكون توصيل أطراف المراحل المختلفة المبينة في الاشكال السابقة إلى الاطراف ، في صندوق النهايات ، على النحو التالي :

بداية المرحلة الاولى S_1 توصل إلى U ونهايتها F_1 إلى X

بداية المرحلة الثانية S_2 توصل إلى V ونهايتها F_2 إلى Y

بداية المرحلة الثالثة S_3 توصل إلى W ونهايتها F_3 إلى Z

الباب الثاني

القوة الدافعة الكهربائية المنتجة في ملفات آلات التيار المتردد

(E.M.F. produced in alternating current machine windings)

مقدمة :

سوف نحتاج في خلال دراستنا للأنواع المختلفة من آلات التيار المتردد ، سواء المتزامنة أو التأثيرية ، وما كان مولداً أو محركاً منها ، إلى حساب قيمة القوة الدافعة الكهربائية التي تتولد في كل مرحلة نتيجة للحركة النسبية بين الملفات ومجال مغناطيسي معين ، ناشئ عن أقطاب مغناطيسية (حقيقية وملموسة ، كما هو الحال في الآلات المتزامنة ، أو تصورية نتيجة لظواهر مغناطيسية مكافئة ومحسوبة ، كما هو الحال في الآلات التأثيرية) عددها $2p$ وتدور بسرعة التزامن n_s ، حيث ترتبط هذه السرعة وعدد الأقطاب بتردد القوة الدافعة الكهربائية المنتجة ، والتيارات المصاحبة لها ، بالعلاقة المعروفة $f = \frac{pn_s}{60}$ ذبذبة في الثانية . ونفترض مبدئياً دائماً أن منحنى كثافة الخطوط المغناطيسية ، الناشئ عن توزيع خطوط المجال المغناطيسي لكل قطب على مدى الخطوة القطبية ، ذو شكل جيبى ، مما يجعلنا نحصل على قوة دافعة كهربائية في الموصلات المختلفة تتغير على منحنى جيبى مع الزمن ، وذلك بسبب الحركة النسبية بين هذه الموصلات والمجال المغناطيسى . وقد سبق شرح ذلك بالتفصيل في البنود الخمسة من الباب الثالث في كتاب هندسة الآلات الكهربائية (المبادئ الأساسية وآلات التيار المستمر ص ١٣١ إلى ص ١٣٨) . والمهمة الملقاة على هاتقنا الآن ، هي كيف نستطيع حساب القوة الدافعة

الكهربية المرحلية للآلة ، بمعلومية القوة الدافعة الكهربية المتولدة في الموصل الواحد ، على هذا الأساس .

فاذا فرضنا أن e_c هي القيمة الفعالة (جذر متوسط المربع) للقوة الدافعة الكهربية المتولدة في كل موصل من موصلات المنتج ، عندما يكون الفيض المغناطيسى في كل قطب هو ϕ خط ، نجد أن :

$$e_c = 1.11 \times 2p \phi \frac{n_s}{60} \times 10^{-8} \text{ فوات } \quad (٢-١)$$

حيث $10^{-8} \cdot 2p \phi \frac{n_s}{60}$ هي القيمة المتوسطة للقوة الدافعة الكهربية المتولدة في الموصل (راجع هندسة الآلات التيار المستمر ص ٣٤١ ، ٣٤٢) ، والرقم 1.11 هو نسبة القيمة الفعالة (أو جذر متوسط المربع) للقيمة المتوسطة في حالة المنحنى الجيبى .

من الواضح أن القوى الدافعة الكهربية في موصلات المرحلة الواحدة ليست في توافق مرحلى معاً ، كما رأينا في الباب السابق الخاص بالملفات . لذلك لا نستطيع الحصول على القوة الدافعة الكهربية المرحلية بضرب e_c في عدد الموصلات التى تحتوى عليها المرحلة الواحدة ، إلا إذا استخدمنا عامل تصحيح معين ، تتوقف قيمته على طريقة تنفيذ اللف في الآلة ، ويطلق عليه اسم معامل اللف (Winding factor) ، ويرمز له بالرمز k_w عادة . فاذا فرضنا أن عدد اللفات في المرحلة الواحدة هو T_{ph} يكون عدد الموصلات فيها $2T_{ph}$ ، وتصبح القيمة الفعالة للقوة الدافعة الكهربية للمرحلية E_{ph} هي :

$$E_{ph} = 2T_{ph} \times e_c \times k_w = 4.44 \frac{pn_s}{60} \phi T_{ph} k_w \times 10^{-8} \\ = 4.44 f \phi T_{ph} k_w \times 10^{-8} \text{ فوات } \quad (٢-٢)$$

معامل اللف عندما تكون q عددا صحيحا :

يتبين مما سبق شرحه في الباب الاول، أن ملفات المرحلة الواحدة تتكون من عدد معين من مجمرات الملفات (مقداره p في الملفات أحادية الطبقة المتمركزة، و $2p$ في الملفات المتمركزة المشطورة، والملفات مزدوجة الطبقة)، التي توصل معاً على التوالي . وتحتل الجوانب المتناظرة في المجموعة الواحدة عدداً من الجمار المتجاورة تحت كل قطب يساوي q ، التي تنتشر على مدى ثلث الخطوة القطبية تحت هذا القطب ، أو ما يساوي 60 درجة كهربية . لذلك يطلق على مثل هذه الملفات بأنها ذات انتشار مرحلي (phase spread) يساوي ثلث الخطوة القطبية أو $\frac{\pi}{3}$. وقياساً على ذلك فإن الملفات ثنائية المراحل تكون ذات انتشار مرحلي مقداره $\frac{\pi}{2}$. وبمراجعة الاشكال الخاصة ببيان توصيلات الملفات في الباب السابق ، يتضح لنا أنه عندما تكون q عددا صحيحا، فإن كل مجموعة من مجموعات الملفات في المرحلة الواحدة تحتل دائماً مكاناً مماثلاً للأماكن التي تحتلها بقية المجموعات بالنسبة للاقطاب المغناطيسية . وهذا يعني أن عصلة القوى الدافعة الكهربائية في موصلات المجموعة الواحدة تساوي في القيمة ، وتتفق مرحلياً، مع عصلة القوى الدافعة الكهربائية في موصلات المجموعات الأخرى ، في المرحلة الواحدة . لذلك يمكننا الحصول على القوة الدافعة الكهربائية المرحلية بضرب قيمة عصلة القوى الدافعة الكهربائية لموصلات المجموعة الواحدة في عدد المجموعات في المرحلة الواحدة . وتكون قيمة المعامل k_p ، وهو معامل اللف ، في هذه الحالة، عبارة عن النسبة بين قيمة عصلة القوى الدافعة الكهربائية الفعلية لموصلات المجموعة الواحدة ، عند جمعها اتجاهياً ، ومجموع نفس هذه القوى عددياً ، باعتبارها في توافق مرحلي معاً . لذلك فإنه عند حساب هذا المعامل يجب التفريق بين الملفات

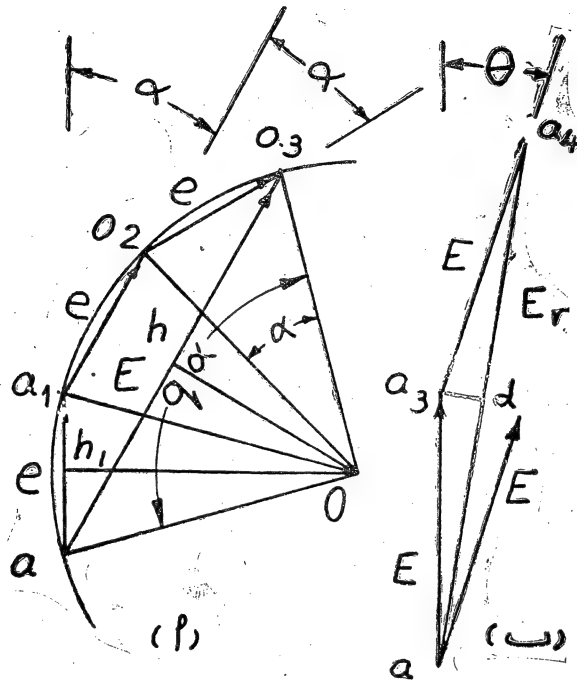
كاملة الخطوة والملفات كسرية الخطوة .

أولاً : بالنسبة للملفات أحادية ، أو مزدوجة الطبقة ، كاملة الخطوة ، حيث يكون اتساع الملف مساوياً خطوة قطبية كاملة ، تكون محصلة القوى الدافعة الكهربائية ، المتولدة في جوانب الملفات المتجاورة تحت أحد الأقطاب ، في المجموعة الواحدة من الملفات ، في اختلاف مرحلي مقداره 180 درجة كهربية بالضبط مع محصلة القوى الدافعة الكهربائية المتولدة في جوانب الملفات المتجاورة الأخرى ، لنفس مجموعة الملفات ، تحت القطب التالي المخالف . لذلك نحصل على قيمة k_w في هذه الحالة بحساب النسبة بين قيمة محصلة القوى الدافعة الكهربائية الفعلية ، المتولدة في جوانب الملفات المتجاورة تحت أحد الأقطاب ، وبمجموع نفس هذه القوى عددياً ، باعتبارها في توافق مرحلي معاً . ويمكن الحصول على هذه النسبة برسم عدد q من المتجهات المتساوية ، كما هو مبين في شكل (١ - ٢) ، التي تختلف مرحلياً عن بعضها البعض بالزاوية α ، ثم جمعها اتجاهياً . فإذا كان طول المتجه الواحد e وطول المتجه المحصل E نجد بالرجوع إلى شكل (١ - ٢) أن :

$$k_w = \frac{E}{q e} = \frac{a a_3}{q \times a a_1} = \frac{2 a h}{2 q \times a h_1} = k_d$$

$$k_d = \frac{O a \sin \frac{q \alpha}{2}}{q \times O a \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{q \alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \dots\dots (٢ - ٣)$$

ثانياً : بالنسبة للملفات مزدوجة الطبقة كسرية الخطوة ، حيث يكون اتساع الملف y مقدراً بالمجاري أقل (أو أكبر) من الخطوة القطبية مقدرة بالمجاري $3q$



شكل (٢-١)

تكون محصلة القوى الدافعة الكهربائية E ، المتولدة في جوانب الملفات التي عددها q تحت أحد الأقطاب في المجموعة الواحدة من الملفات ، في اختلاف مرحلي أقل من 180 درجة كهربية بالزاوية θ مع محصلة القوى الدافعة الكهربائية E ، المتولدة في جوانب الملفات المتجاورة الأخرى لنفس مجموعة الملفات تحت القطب التالي المخالف ، حيث يطلق على الزاوية بين $(3q - \gamma)$ ، $3q$ اسم نسبة التقصير في الخطوة القطبية ، ويكون .

$$\theta = \frac{3q - \gamma}{3q} \times 180 \text{ درجة كهربية} \quad (٢-٤)$$

وفي هذه الحالة نجد أن القوة الدافعة الكهربائية الكلية التي نحصل عليها من جميع

جوانب الملفات في المجموعة الواحدة لا تساوى $2E$ ، كما حدث في أولا ، وإنما يتعين علينا جمع المتجهين E ، E ، اللذين يحصران بينهما الزاوية θ ، لكي نحصل على محصلة القوى الدافعة الكهربائية E_r في مجموعة الملفات . وبذلك تصبح قيمة معامل اللف هي :

$$k_w = \frac{E}{q e} \times \frac{E_r}{2E} = k_d \times k_c \dots \dots \dots (٢-٥)$$

ويطلق على المعامل k_d اسم معامل التوزيع (Distribution factor) ، وتحسب قيمته باستخدام المعادلة (٢-٣) حيث كان $k_w = k_d$ ، لأن $k_c = 1$. ويطلق على k_c اسم المعامل الوترى (Chording factor) ، وتحسب قيمته من المعادلة التالية (٢-٦) ، التي نحصل عليها بالرجوع إلى شكل (٢-١ ب) ، وتطبيق القاعدة المعطاة حيث :

$$k_c = \frac{E_r}{2E} = \frac{a a_4}{2a a_3} = \frac{a d}{a a_3} = \cos \frac{\theta}{2} \dots \dots (٢-٦)$$

معامل اللف عندما تكون q عددا كسريا :

يجب التمييز في هذه الحالة بين الملفات أحادية ، أو مفردة الطبقة ، والملفات ثنائية ، أو مزدوجة الطبقة :

أولا : بالنسبة للملفات أحادية الطبقة يتحدد اتساع الملف على حسب نوع الملفات المستعملة (متمركزة أو ماسية . . . إلخ) ، وعلى حسب التغير في عدد المجارى الخاصة بكل مرحلة تحت كل قطب ، لضبط القيمة المتوسطة المطابقة لـ q . ويحدث تبعاً لذلك تقصير في الخطوة القطبية تتحدد نسبته على حسب قيمة q . ويمكن الحصول على معامل اللف في هذه الحالة بالاستعانة بمخطط نجمة المجارى ، فنجمع المتجهات الخاصة بإحدى المراحل ، بعد تحديدها في هذا المخطط ، ثم نقسم

طول محصلة هذه المتجهات على عددها مضروبا في طول الواحد منها . ويمكن
عوما حساب قيمتي كل من k_c و k_d باستخدام المعادلتين (٢-٣) ، (٢-٦)
مرة أخرى ، ولكن بالنعويض بقيمتين مكافئتين لـ q ونسبة التقصير ، نحصل عليهما
كما يأتي :

إذا وضعنا قيمة q على هيئة كسر غير حقيقي ، أي بالصورة $\frac{b}{c}$ ، يجب أن
يكون عدد أزواج الأقطاب في الآلة مكرراً صحيحاً للعدد G ، حتى يمكن تنفيذ
هذا النوع من الملفات ، كما سبق أن بينا في الباب الأول . بهذا يمكن تقسيم المجارى
إلى مجموعات متماثلة عددها $\frac{2p}{C}$ وتحتوى كل مجموعة منها على b من المجارى

لكل مرحلة $\left(\frac{\frac{b}{C} \times 2p \times 3}{\frac{2p}{C} \times 3} = \right)$. وهذا يعنى أن كل مرحلة

أصبحت تتكون من مجموعات تحتل أماكن متماثلة بالنسبة للأقطاب ، وتحتوى
كل منها على b من المجارى المتجاورة ، مما يجعلنا نستطيع حساب معامل التوزيع
 k_d في هذه الحالة باستخدام العدد b ، كقيمة مكافئة ، بدلا من q في المعادلة (٢-٣) .
ولم جانب هذا نجد أنه نظراً لأن اتساع الملف y ، مقدراً بعدد المجارى بين
جانبيه ، يجب أن يكون عددا صحيحاً ، في حين يكون $3q$ فى الغالب عددا كسرياً ،
تنتج مامات كسرية الخطوة غالباً فى هذه الحالة بنسبة التقصير $\frac{3q - y}{3q}$ ،
التي يمكن استخدامها فى حساب المعامل التوزيى k_c باستخدام المعادلة (٢-١) .
بذلك نحصل على معامل الملف k_w بضرب k_d فى k_c اللتين حصلنا عليهما .

ثانياً : بالنسبة للملفات مزدوجة الطبقة نجد أن حساب k_d يتبع نفس
الطريقة التى اتبعت مع الملفات أحادية الطبقة . وذلك لأن ترتيب جوانب

الملفات فى الطبقات العلوية من الجارى يسير على نمط ترتيب جوانب الملفات أحادية الطبقة بالضبط ، كما سبق شرحه فى الباب الأول . وهذا يعنى أننا نستطيع حساب قيمة معامل التوزيع k_p فى هذه الحالة أيضا باستخدام العدد b كقيمة مكافئة بدلا من q فى المعادلة (٣-٢) . ولا توجد أية صعوبة بالنسبة لحساب المعامل k_p فى هذه الحالة باستخدام المعادلة (٦-٢) مرة أخرى ، وذلك نظرا لعدم وجود أية قيود يفرضها تنفيذ الملفات على y ، وإنما نستطيع أن نختار لها أية قيمة نشاء ، على حسب ما تفرضه علينا احتياجات التصميم .

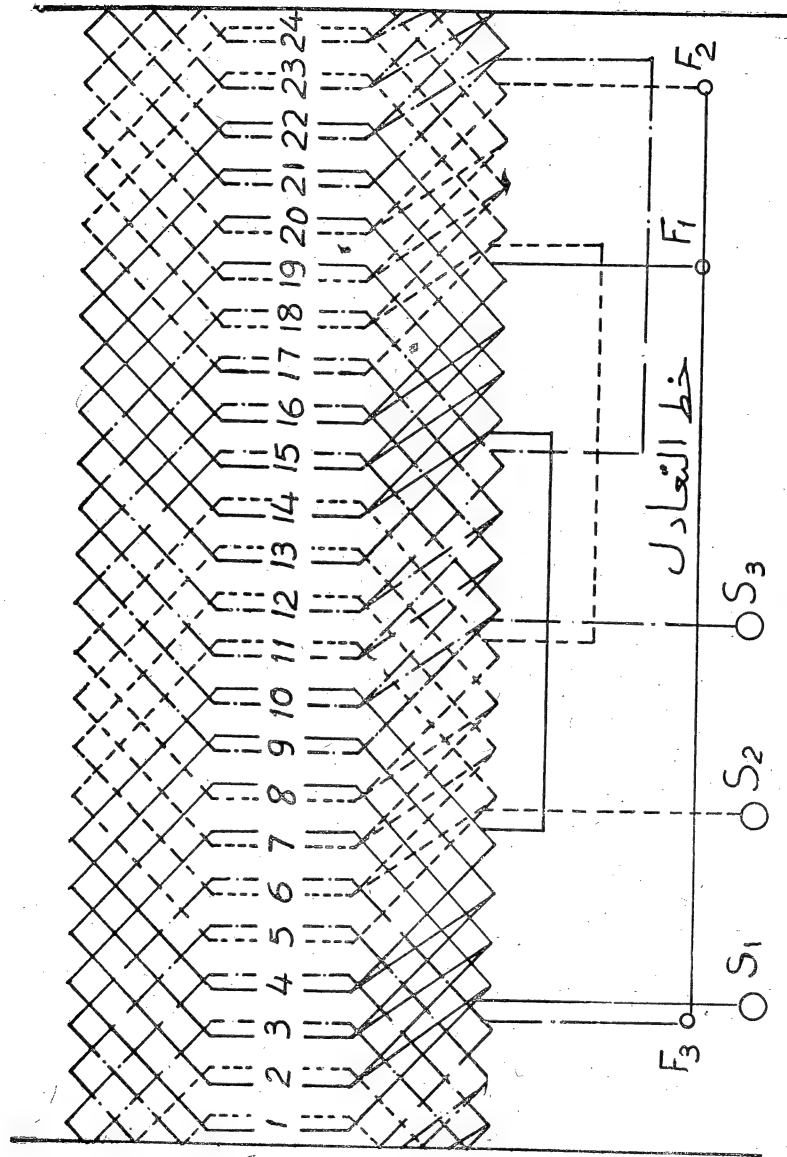
تأثير الانتشار المرحلى على معامل التوزيع ومقنن قدرة الآلة :

فى الملفات أحادية الطبقة تنتشر الجارى، التى تخص كل مرحلة تحت كل قطب، على مدى ثلث الخطوة القطبية ، التى تمتد على سطح المنتج بما يساوى 180 درجة كهربية . ولذلك يقال إن الانتشار المرحلى للملفات يبلغ 60 درجة كهربية، كما سبقت الإشارة إليه من قبل . ولكى يمكن توزيع الملفات على الجارى ، بحيث يسهل توصيلها معاً ، للحصول على أكبر قيمة ممكنة القوة الدافعة الكهربائية المرحلية ، وتكون المراحل الثلاثة متماثلة (symmetrical) ، يتحتم أن يكون الانتشار المرحلى لهذا النوع من الملفات بهذه القيمة، أى 60 درجة كهربية .

أما فى الملفات مزدوجة الطبقة ، فإننا نستطيع توزيع الجارى على المراحل المختلفة بنفس الطريقة السابقة ، فنحصل على انتشار مرحلى للملفات مقداره 60 درجة كهربية . كما أننا نستطيع توزيع الجارى على المراحل المختلفة ، بحيث تنتشر الجارى، التى تخص كل مرحلة، على مدى ثلثى الخطوة القطبية ، حيث يصبح الانتشار المرحلى للملفات 120 درجة كهربية فى هذه الحالة . ويمكن تنفيذ الآلة بأية قيمة لا تتساع الملف ، كما فعلنا فى الحالات السابقة ، بخطوة كاملة أو بخطوة

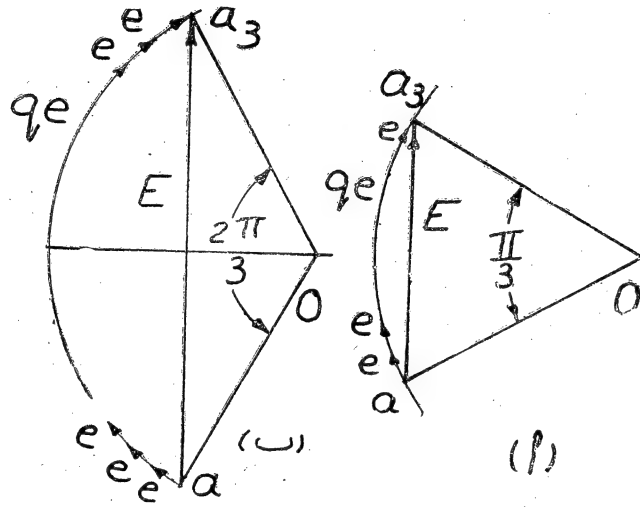
كهربية، شكل (٢-٢) ، فنحصل على معامل وترى يساوى الوحدة ، أو كسراً
تحتسب قيمته باستخدام المعادلة (٢-٦) ، على أساس أن θ هى مقدار التقصير
في الخطوة القطبية ، محسوبة بالدرجات الكهربية ، تماماً على النحو السابق . ولكن
معامل التوزيع يختلف في هذه الحالة اختلافاً بيننا عن الحالة السابقة ، كما يتضح مما
يأتى :

إذا كانت قيمة q تساوى الواحد الصحيح فإن قيمة معامل التوزيع ، كما تعطىها
المعادلة (٢-٣) ، تصبح الوحدة على أى الحالات ، حيث تكون $E = e$ في شكل
(٢-١) وتوافقان معاً مرحلياً . فإذا زادت قيمة q عن واحد زاد عدد
المتجهات e بنفس المقدار ، بحيث تقل قيمة q عن الواحد الصحيح . ويلاحظ
أنه كلما ازدادت قيمة q كلما قلت قيمة معامل التوزيع ، حيث تزيد قيمة qe ،
وذلك باعتبار قيمة ثابتة لـ E . وتصبح قيمة qe أكبر ما يمكن ، أى تصبح قيمة
معامل التوزيع أصغر ما يمكن ، عندما تصبح قيمة q كبيرة جداً (مالانهاية) ،
بحيث تنطبق المتجهات المتناهية في الصغر e على القوس $a_1 a_2 a_3$ ، كما يظهر في
شكلى (٢-٣ أ ، ب) فإذا فرضنا أساساً أن قيمة q كبيرة يمكننا اعتبار أن
قيمة qe تمثل تقريباً بطول قوس الدائرة a_3 ، المحصور بين طرفي المتجه المحصل
 E ، كما هو مبين في شكل (٢-٣ أ ، ب) ، حيث يمثل الشكل أ حالة ملفات
ذات انتشار مرحلى 60 درجة كهربية ، ويمثل ب حالة ملفات ذات انتشار
مرحلى 120 درجة كهربية ، مع استخدام نفس القيمة لـ q في الحالتين . وهذا
ويؤدى الافتراض بأن قيمة q متناهية في الكبر إلى التسليم بأن قيمة الزاوية α
تصبح متناهية في الصغر في الحالتين ، حيث $\alpha = \frac{60}{q}$ في الحالة الأولى ،
 $\alpha = \frac{120}{q}$ في الحالة الثانية . بذلك نستطيع أن نعتبر أن $\sin \alpha = \alpha$ في



شكل (٢-٢)

الحالتين ، فنحصل على معامل التوزيع في كل حالة باستخدام المعادلة (٢-٣) ،
معادلة على هذا الأساس ، كما يأتي :



شكل (٢-٣)

الحالة الأولى ، عندما يكون الانتشار المرحلي $\frac{\pi}{3}$ (أى 60 درجة كهربية)

$$k_d = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \times \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\frac{1}{2} \times \frac{\pi}{3}} = \frac{1}{2} \times \frac{6}{\pi} = 0.955 \dots (٢-٧)$$

الحالة الثانية ، عندما يكون الانتشار المرحلي $\frac{2\pi}{3}$ (أى 120 درجة كهربية)

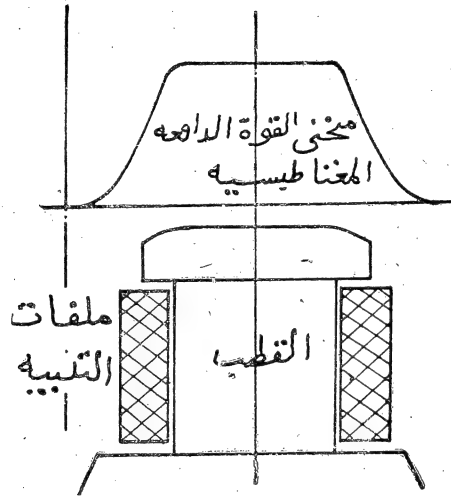
$$k_d = \frac{\sin \frac{2\pi}{3}}{\frac{1}{2} \times \frac{2\pi}{3}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0.827 \dots (٢-٨)$$

وهذا يعنى أنه بالنسبة لمولدين متماثلين من جميع النواحي ، يحتوى كل منهما على نفس عدد الملفات T_{ph} فى كل مرحلة ، ويكون الانتشار المرحلى للملفات الاول $\frac{\pi}{3}$ ، والانتشار المرحلى للملفات الثانى $\frac{2\pi}{3}$ ، نحصل على قوة دافعة كهربية مرحلية من الاول تساوى 1.10 ($\frac{0.955}{0.827} =$) مرة تلك التى نحصل عليها من الثانى . فاذا استخدمنا نفس التيار فى الحالتين نحصل على مقنن قدرة من المولد الاول يزيد بمقدار ١٥ ٪ على مقنن القدرة الذى نحصل عليه من الثانى . وهذا هو ما يجعلنا نفضل فى الغالب استخدام الانتشار المرحلى الضيق ، فى حالة الملفات مزدوجة الطبقة هذا علاوة على أن تنفيذ الف يكون بصورة أكثر سهولة ويسر ، وخاصة بالنسبة لتكوين الملفات ، فى حالة الملفات أحادية الطبقة ، مع الانتشار المرحلى الضيق ($\frac{\pi}{3}$) ، أيضا .

التوافقيات فى منحنى المجال (Harmonics in field wave) :

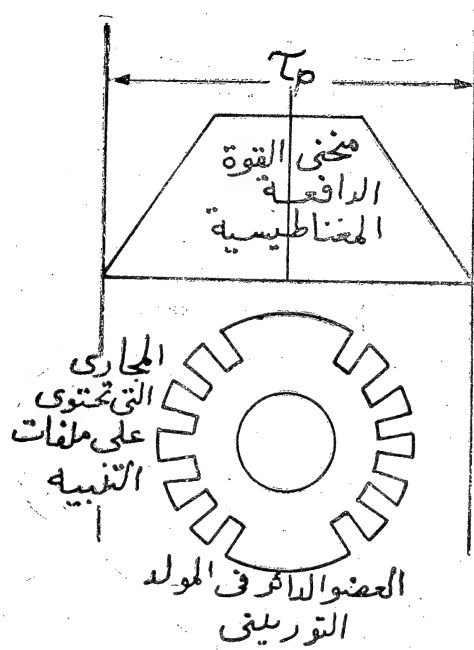
يوجد نوعان من الآلات المتزامنة يتميز كل منهما عن الآخر بطريقة تكوين الأقطاب المغناطيسية ، الموجودة على العضو الدائر ، وطريقة ترتيب ملفات التنبيه ، على هذه الأقطاب ، تبعاً لذلك : النوع الاول ، ويطلق عليه اسم الآلات ذات الأقطاب البارزة (Salient pole machines) ، يحتوى على أقطاب من النوع البارز ، كما فى شكل (١-٢) ، (١-٣) . وتكون ملفات التنبيه التى تستخدم فى هذه الحالة من النوع الاسطوانى ، وهى تعطى قوة دافعة مغناطيسية يكون توزيعها على مدى الخطوة القطبية كما هو مبين فى شكل (٢-٤) على وجه التقريب . النوع الثانى ، ويطلق عليه اسم الآلات التوربينية (Turbo machines) ، يحتوى على عضو دائر اسطوانى ذو مجارى موزعة على ثلثي المحيط ، تحملها ملفات

التنبية، شكل (٥-٢)، التي تعطى في هذه الحالة مجالا مغناطيسيا ذا قطبين فقط، بينما يكون عدد الأقطاب في النوع الأول أربعة أو أكثر. لذلك فإن سرعة الآلات التوربينية تكون 3000 لفة في الدقيقة، باعتبار تردد قياسي 50 ذبذبة في الثانية.



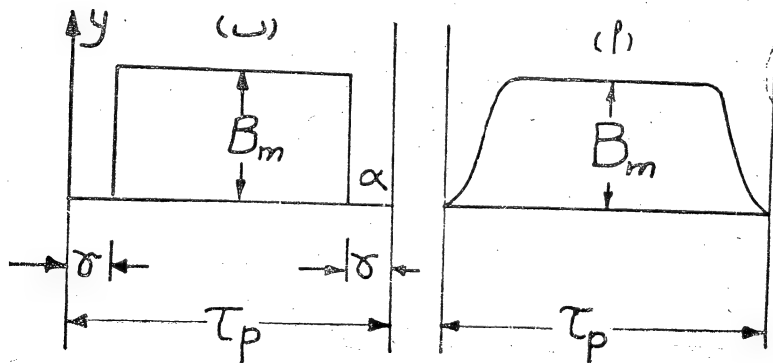
شكل (٤-٢)

ويكون توزيع القوة الدافعة المغناطيسية على مدى الخطوة القطبية، كما هو مبين في شكل (٥-٢) ويتوقف توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية، على مدى الخطوة القطبية في كلا النوعين، على مقدار المقاومة المغناطيسية عند النقط المختلفه في هذه الثغرة وعموما فإنه، علاوة على التوزيع الجيبي لهذه الكثافة، الذي يصعب الحصول عليه عمليا، والذي اتخذناه أساسا للحساب في الحالات السابقة، يكون توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية للآلات المتزامنة، مع عمل ترتيبات معينة بالنسبة لإنحناء سطح القطب



شكل (٥ - ٢)

المواجهه المنقح ، على نمط المنحنى المبين في شكل (٦ - ٢ أ) ، الذي يمكن الاستعاضة عنه بالمنحنى المكافئ المستطيل الشكل المبين في شكل (٦ - ٢ ب) ،



شكل (٦ - ٢ أ ، ب)

وهو يعطى نفس قيمة الفيض المغناطيسى لكل قطب ، على حسب ما سبق بيانه
فى كتاب هندسة الآلات الكهربائية آلات التيسار المستمر (ص ٢٢٥ — ٢٢٨) .
والسبب فى اللجوء إلى هذا المنحنى المستطيل الشكل هو إمكانية التعبير عنه
بمعادلة رياضية ، بينما يصعب ذلك جداً بالنسبة للمنحنى الاصلى .

يمكن حساب القوة الدافعة الكهربائية للآلة المتزامنة باستخدام المعادلات من
(٢ — ٢) إلى (٢ — ٦) عندما يكون منحنى توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية
فى الشفرة الهوائية على مدى الخطوة القطبية ذا شكل جيبي . أما بالنسبة للمنحنى
المبين فى شكل (٢ — ٦ ب) ، فيمكننا تحليله إلى توافقاته الأساسية والعالية
(Fundamental and higher harmonics) ، ونطبق المعادلات السابقة على
كل منها على حدة باعتباره منحنى جيبي ، كما سوف يتضح حالاً .

التوافقيات فى منحنى الضبط المرحل :

يبين شكل (٢ — ٧) منحنى توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية فى الشفرة
الهوائية للآلة المتزامنة على مدى الخطوة القطبية ، وبعض التوافقيات التى يمكن
تحليله إليها ، بما فى ذلك التوافقية الأصلية ، باستخدام النظرية الرياضية المعروفة
فى هذا الصدد ، وهى تحليل فوريير المتوالى (Fourier's series analysis) فإذا
كانت B_m هى اتساع (amplitude) الموجة المستطيلة الممثلة على مدى الخطوة
القطبية (π من الدرجات الكهربائية) على النحو التالى :

قيمة الدالة y هى $y=0$ فى المدى من $\alpha=0$ إلى $\alpha=\gamma$ ، ثم $y=B_m$ من
 $\alpha=\gamma$ إلى $\alpha=\pi-\gamma$ ، وأخيراً $y=0$ من $\alpha=\pi-\gamma$ إلى $\alpha=\pi$.
ومسح ملاحظة أن التحليل لا يحتوى إلا على الجيوب من الدرجة الفردية
(odd sines) ، لأن الدالة متماثلة حول نقطة الأصل ، نجد أن اتساع التوافقية

التي درجتها r هو :

$$B_r = \frac{2}{\pi} \int_0^\gamma 0. \sin r \alpha d\alpha + \frac{2}{\pi} \int_\gamma^{\pi-\gamma} B_m \sin r \alpha d\alpha \\ + \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\gamma}^\pi 0. \sin r \alpha d\alpha = \frac{\cos r \gamma}{r} \cdot \frac{4B_m}{\pi} \dots (2-9)$$

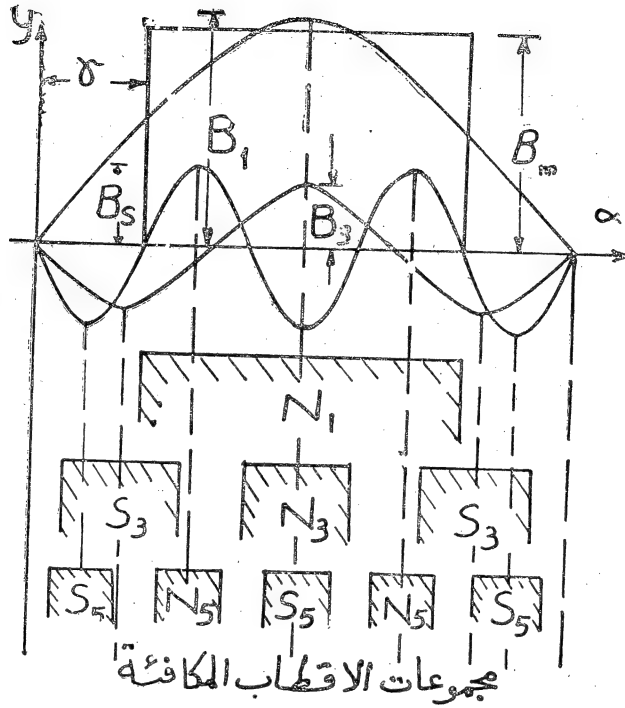
وتصبح الدالة بتحليل فوريير المتوالى كما يأتى :

$$y = \frac{4B_m}{\pi} \left[\cos \gamma \sin \alpha + \frac{\cos 3\gamma}{3} \sin 3\alpha \right. \\ \left. + \frac{\cos 5\gamma}{5} \sin 5\alpha + \dots \right] \dots\dots (2-10)$$

يمكن اعتبار أن المنحنى الجيبى ، الذى تمثله كل توافقية من التوافقيات في المعادلة (٢-١٠) ، عبارة عن توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية في الآلة لمجموعة مكافئة ، وقائمة بذاتها من الأقطاب المغناطيسية ، شكل (٢-٧) ، وهى التى ينتج عن حركتها بالنسبة للملفات المنتج توليد توافقية مناظرة من الضغط فيها . ونستطيع الحصول على القيمة الفعالة لتوافقية الضغط التى درجتها r في هذه الحالة باستخدام المعادلات من (٢-٢) إلى (٢-٦) مع أخذ درجة التوافقية في الاعتبار ، بالنسبة للعوامل المختلفة ، وذلك بمراعاة النقط الآتية :

١ يكون تردد توافقية الضغط التى درجتها r هو $f_r = rf$ ، وذلك لأن توافقية كثافة الخطوط المغناطيسية التى أنتجتها ناشئة عن $2pr$ من الأقطاب المغناطيسية المكافئة ، التى تدور بنفس سرعة التزامن n_s $\left(f = \frac{p n_s}{60} \right)$ ،

كما يتضح من شكل (٧-٢) .



شكل (٧-٢)

٢ - حيث أن عدد الاقطاب المغناطيسية المكافئة، لتوافقية كثافة الخطوط التي درجتها r ، هو $2pr$ كما يتضح من شكل (٧-٢)، فإن كل زاوية يكون مقدارها بالدرجات الكهربائية هو α ، باعتبار مجموعة الاقطاب الاساسية (fundamental)، يصبح مقدارها بالدرجات الكهربائية $r\alpha$ ، وذلك بالنسبة لكل ما يخص التوافقية التي درجتها r (الزاوية بالدرجات الكهربائية = الزاوية الاصلية بالدرجات الميكانيكية $\times 2pr$) .

لذلك نجد أن قيمة كل من معامل التوزيع والمعامل الوتري تصبح بالنسبة

للتوافقية التي درجتها r عبارة عن :

$$k_{dr} = \frac{\sin \frac{q\alpha r}{2}}{q \sin \frac{\alpha r}{2}}, \quad k_{cr} = \cos \frac{r\theta}{2} \dots \dots (٢-١١)$$

٣ — إذا كان طول الخطوة القطبية الاصلية على الآلة هو r_p من المستقيمات، يصبح طول الخطوة القطبية في مجموعة الاقطاب المكافئة، للتوافقية التي درجتها r ، عبارة عن $\frac{r_p}{r}$. وبذلك يكون الفيض المغناطيسى ϕ_r ، الناتج عن كل قطب من هذه الاقطاب، بالخطوط هو :

$$\phi_r = \frac{r_p}{r} I_i B_r \times \frac{2}{\pi} \dots \dots (٢-١٢)$$

وذلك باعتبار أن $B_r \times \frac{2}{\pi}$ هي القيمة المتوسطة لكثافة الخطوط المغناطيسية لهذه التوافقية في الثغرة الهوائية و I_i هو طول الآلة المشالى بالمستقيمات (كتاب هندسة الآلات الكهربائية ، آلات التيار المستمر ص ٢٢٧).
كما تعطى المعادلة (٢-٩).

فاذا كانت E_r هي القيمة الفعالة لتوافقية الضغط ، التي درجتها r في منحنى الضغط ، نجد بناء على ما سبق كله أن :

$$E_r = 4.44 f_r \phi_r T_{ph} k_{dr} k_{cr} \times 10^{-8} V \dots \dots (٢-١٣)$$

حيث ϕ_r و k_{cr} و k_{dr} كما تعطى المعادلتان (٢-١١) ، (٢-١٢) .

ويكون تمثيل منحنى الضغط المرحلى (بالنسبة للرحلة الاولى) بتحليل

فوريير المتوالى عبارة عن :

$$e_1 = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t + \sqrt{2} E_3 \sin 3\omega t + \sqrt{2} E_5 \sin 5\omega t + \dots \quad (٢-١٤)$$

وتكون قيم $E_1, E_3, E_5 \dots$ من المعادلة (٢-١٣) باستخدام $r = 1, 3, 5 \dots$. ويحتوى منحني الضغط المرحلى على توافقيات بنفس درجات توافقيات منحنى توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية في الشعرة الهوائية ، وتكون القيمة الفعالة للضغط المرحلى في الآلة عبارة عن :

$$E_{ph} = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots} \quad \dots \dots \dots (٢-١٥)$$

تأثير معامل التوزيع والمعامل التوتري على توافقيات الضغط المرحل :

يبين الجدول الآتى قيم معامل التوزيع للتوافقيات ذات الدرجات المختلفة ، من 1 إلى 19 ، وذلك عندما تختلف قيمة q من 2 إلى 6 .

ويتضح من هذا الجدول أن قيمة معامل التوزيع تقل بدرجة ملحوظة في التوافقيات التى تزيد درجتها عن 1 ، فيما عدا التوافقتين الحادية عشرة والثالثة عشرة عندما تكون $q = 2$ ، وكذلك التوافقتين السابعة عشرة والتاسعة عشرة عندما تكون $q = 3$. فإذا راعينا أن قيمة B_r تقل هى الأخرى بصورة ملحوظة في التوافقيات ذات الدرجات العالية ، يمكننا أن نقول إن توافقيات الضغط ذات الدرجات العالية تكون فى الغالب ذات اتساع صغير بالنسبة لإتساع التوافقية الأصلية . أما بالنسبة للإشارة السالبة ، التى تسبق بعض قيم معامل التوزيع فى الجدول ، فإنها تشير إلى ظهور تأثير جديد لتوزيع الملفات فى مجارى متجاورة عددها q بالنسبة للرحلة الواحدة ، وهى تعنى أن التوافقية قد أصبحت فى هذه الحالة فى اختلاف مرحلى مع التوافقية الأساسية مقداره 180 درجة كهربية .

يتضح من المعادلة (٢-١١) أننا نستطيع حذف أية توافقيات من التوافقيات

r	q = 2	q = 3	q = 4	p = 5	q = 6
1	0.9659	0.9598	0.9577	0.9567	0.9561
3	0.7071	0.6667	0.6533	0.6472	0.6440
5	0.2588	0.2176	0.2053	0.2000	0.1972
7	-0.2588	-0.1774	-0.1576	-0.1494	-0.1453
9	-0.7071	-0.3333	-0.2706	-0.2472	-0.2357
11	-0.9659	-0.1774	-0.1261	-0.1095	-0.1017
13	-0.9659	0.2176	0.1261	0.1022	0.0920
15	-0.7071	0.6667	0.2706	0.2000	0.1726
17	-0.2588	0.9598	0.1576	0.1022	0.0837
19	0.2588	0.9598	-0.2053	-0.1095	-0.0837

حذفاً تاماً من منحنى الضغط المرحلي عندما نعوض عن r بدرجة هذه التوافقية، ونحصل على قيمة k_{cr} تساوى صفراً، أى عندما تكون قيمة $\frac{r\theta}{2}$ تساوى $\frac{3\pi}{2}$ أو $\frac{\pi}{2}$. وهذا يستلزم إعطاء الزاوية θ قيمة معينة في هذه الحالة، أى عمل تقصير في خطوة الملف أو اتساعه بنسبة معينة. فإذا أردنا حذف التوافقية الثالثة مثلاً يجب أن تكون قيمة $\theta = \frac{\pi}{3}$ أو 60 درجة كهربية، وهذا يعني استخدام خطوة أو اتساع للملف مقداره ثلثا الخطوة القطبية، أى 120 درجة

كهربية . كما أنه يمكن حذف التوافقية السابعة بجعل $\theta = \frac{\pi}{7}$ ، والتوافقية الخامسة بجعل $\theta = \frac{\pi}{5}$. وفي الواقع أننا نستطيع خفض قيمة الضغط إلى حد كبير (إلى الربع تقريباً) ، لكل من هاتين التوافقتين الأخيرتين ، باتخاذ اتساع للملف وسطا بين الحدين اللذين يسمحان بحذفها ، وهو خمسة أسداس الخطوة القطبية في هذه الحالة ، أى بزاوية تقصير مقدارها 30 درجة كهربية ، بما يناظر نسبة تقصير مقدارها السدس .

هذا ويراعى عند كتابة معادلة الضغط المرحلى على الصورة المبينة في المعادلة (١٤-٢) أن تؤخذ اشارات توافقيات الضغط المختلفة E_1, E_3, E_5, \dots في الحساب ، كما تحدد المعاملات k_{dr} و k_{cr} في المعادلة (١١-٢) ، وذلك حتى يمكن تحديد مقدار التوافق أو الاختلاف المرحلى بين كل توافقية والتوافقية الأصلية .

نخرج من هذا كله بنتيجة هامة ، وهى أنه فى الآلات المترامنة ، التى تتراوح فيها قيمة q بين 2 و 6 ، والتى يكون اتساع الملفات فيها بنسبة تقصير تقع بين الثلث والسدس ، نحصل على قوة دافعة كهربية مرحلية من الآلة تتحدد أساساً ، وبدرجة تقريب مقبولة ، باستخدام التوافقية الأساسية فى منحنى توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية فقط ، وهى ذات الاتساع B_1 ، أى أن :

$$E_{ph} \approx 4.44 p \frac{n_s}{60} \times r_p l_i B_1 \times \frac{2}{\pi} \times T_{ph} k_d k_c \times 10^{-8} V$$

$$\approx 3.12 f r_p l_i B_m T_{ph} k_d k_c \times 10^{-8} V \dots (١٦ \quad ٢)$$

وذلك باعتبار أن منحنى توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية فى الشفرة

الهوائية أمام القطب كما هو مبين في شكل (٦ - ٢ ب) ، حيث أن γ تساوى 30 درجة تقريباً .

التوافقيات في الضغط الخطى :

باستخدام المعادلة (١٤ - ٢) ، ووضع ($\omega t - 120$) ثم ($\omega t - 240$) بدلا من ωt ، يمكننا الحصول على معادلتى الضغط في المرحلتين الثانية والثالثة ، بحيث تصبح معادلات الضغط في المراحل الثلاث هى :

$$e_1 = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t + \sqrt{2} E_3 \sin 3\omega t + \sqrt{2} E_5 \sin 5\omega t + \dots$$

$$e_2 = \sqrt{2} E_1 \sin (\omega t - 120) + \sqrt{2} E_3 \sin 3(\omega t - 120) + \dots$$

$$= \sqrt{2} E_1 \sin (\omega t - 120) + \sqrt{2} E_3 \sin 3\omega t + \dots$$

$$e_3 = \sqrt{2} E_1 \sin (\omega t - 240) + \sqrt{2} E_3 \sin 3(\omega t - 240) + \dots$$

$$= \sqrt{2} E_1 \sin (\omega t - 240) + \sqrt{2} E_3 \sin 3\omega t + \dots (١٧ - ٢)$$

وهذا يعنى أن التوافقيات ذات الدرجة الثالثة ومضاعفاتها الفردية (9 ، 15 ، ... إلخ) تكون في توافق مرحلى في المراحل الثلاث ، مما يؤدي إلى حدوث الظواهر الآتية عند توصيل مراحل المولد بنجمه أو دلتا :

أولا ، عند توصيل المراحل بنجمة : نظراً لأن الضغط الخطى في هذه الحالة يكون عبارة عن الفرق بين ضغطى مرحلتين متعاقبتين (هندسة الآلات الكهربائية المبادئ الأساسية ص ١٧٩) ، لا تظهر التوافقيات ذات الدرجة الثالثة ومضاعفاتها الفردية في الضغط الخطى للمولد ، حيث تتعادل كل اثنين منها من نفس الدرجة معا . لذلك فإنه عند حساب قيمة الضغط الخطى للمولد ، في هذه الحالة ، لا يجب ضرب الضغط المرحلى في $\sqrt{3}$ مباشرة ، وإنما تحذف أولاً

توافقيات الضغط ذات الدرجة الثالثة ومضاعفاتها الفردية من الضغط المرحلي ،
فمحصول على قيمة الضغط الخطي E_L ، على هذا الأساس ، كما يأتي :

$$E_L = \sqrt{3} \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + E_7^2 + E_{11}^2 + \dots} \dots (١٨-٢)$$

ثانياً ، عند توصيل المراحل دلتا : إن إمكانية توصيل المراحل دلتا هو
نتيجة مباشرة لأن مجموع القيم اللحظية للضغط في هذه المراحل يساوي صفراً دائماً ،
أي أن $e_1 + e_2 + e_3 = 0$ (هندسة الآلات الكهربائية ، المبادئ الأساسية ص
١٨٢) . ولكن عند وجود توافقيات من الدرجة الثالثة ومضاعفاتها في الضغوط
المرحلية الثلاثة تكون الدلتا دائماً دائرة قصر ، بالنسبة للتوافقيات الثلاث من كل درجة
مجمعة معاً ، فتمر تيارات قصر محلية حول الدلتا بداخلها . وتتوقف قيمة كل
تيار من هذه التيارات على معاوقة ملفات المراحل الثلاث في الدلتا المقفلة ، التي
تحدد حسب درجة التوافقية ، كما يتضح من الآتي :

إذا كانت مقاومة ملفات المنتج المرحلية هي R_a أوم ، وممانعة نفس هذه
الملفات المرحلية هي x_a أوم ، وذلك عند التردد الأساسي (fundamental frequency)
نجد أن : $\omega = 1$ — بالنسبة لتوافقيات الدرجة الثالثة تكون محصلة
الضغط حول الدلتا المقفلة $3E_3$ ، والممانعة المرحلية لل ملفات $3x_a$ أوم ، فتعطى تيار
قصر داخل الدلتا قيمته الفعالة I_3 ، حيث :

$$I_3 = \frac{3 E_3}{3 \sqrt{R_a^2 + (3x_a)^2}} \dots \dots \dots (١٩-٢)$$

٢ — بالنسبة لتوافقيات الدرجة $3n$ حيث $n = 1, 3, 5 \dots$ ، يكون
محصلة الضغط حول الدلتا $3E_{3n}$ ، والممانعة المرحلية لل ملفات $3nx_a$ أوم ، فتعطى
تيار قصر داخل الدلتا قيمته الفعالة I_{3n} (n عدد صحيح فردي) ، حيث :

$$I_{3n} = \frac{E_{3n}}{\sqrt{R_a^2 + (3n x_a)^2}} \dots\dots\dots (٢-٢٠)$$

تكون قيمة x_a في الآلات المتزامنة في العادة أكبر من R_a كثيراً ، مما يجعلنا نستطيع إهمال R_a بالنسبة إلى $3n x_a$ ، حتى عندما تكون $n = 1$ ، فنحصل على تيار قصر متخلف مرحلياً عن ضغط التوافقية التي أنتجته بزاوية مقدارها 90 درجة كهربية . وحيث أن هذه التوافقيات جميعها في اتفاق مرحلي أو مختلفه مرحلياً بزاوية 180 درجة (على حسب إشارة E_{3n}) ، فإن تيارات القصر الناتجة عنها تكون هي الأخرى في اتفاق مرحلي أو مختلفه مرحلياً بزاوية 180 درجة ، وتكون قيمة تيار القصر الكلي I_{t3} في الدلتا عبارة عن :

$$I_{t3} = \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2} \dots\dots\dots (٢-٢١)$$

وكل تيار تردده مكرر ثلاثة أمثال التردد الاساسي f ، وتوضع الإشارة سالبة أو موجبة أمام قيمة كل تيار على حسب ما إذا كانت توافقية الضغط التي أنتجته سالبة أو موجبة .

ويلاحظ أن كل تيار من تيارات القصر هذه يعطى هبوط ضغط في المرحلة يساوى ضغط التوافقية التي أنتجته ، مما يؤدي إلى عدم ظهور ضغوط التوافقيات ذات الدرجة الثالثة ومضاعفاتها الفردية في ضغط الدلتا عند قياسه بين خطين . لذلك فإننا نحصل على الضغط المرحلي في حالة التوصيل دلتا (وهو يساوى أيضاً الضغط الخطي) من المعادلة الآتية :

$$E_{ph} = \sqrt{E_1^2 + E_5^2 + E_7^2 + E_{11}^2 + \dots} \dots (٢٢-٢)$$

أما إذا فتحت الدلتا لأي سبب من الأسباب فإن الضغط المرحلي الذي يمكن قياسه بين خطين من الخطوط يصبح :

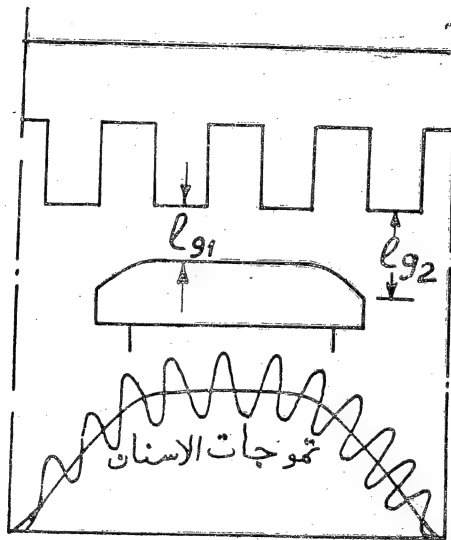
$$E_{ph} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots} \quad (٢٣-٢)$$

وبسبب وجود تيار القصر ، المعطى بالمعادلة (٢١-٢) ، في الدلتا المقفلة ،
نتفادى في العادة توصيل مراحل الموصلات المتزامنة على شكل دلتا ، وذلك لأن
تيار القصر يؤدي إلى حدوث مفقودات نحاسية زائدة في ملفات المولد ، مما قد
يتسبب عنه زيادة في ارتفاع درجة حرارتها عن الحد المقرر . هذا علاوة على
ما قد ينجم من متاعب فنية (Technical troubles) أخرى يضيق النطاق هنا
عن حصرها نتيجة لوجود هذا التيار . لذلك فإن الشائع هو توصيل مراحل
الموصلات المتزامنة (والمحركات أيضا) نجمة ، وعندما يضطر ، بسبب احتياجات
معينة ، إلى توصيلها دلتا ، يجب مراعاة أن يكون اتساع الملفات في الآلة عند
تصميمها إذا نسبة تقصين مقدارها الثلث ، لكي نتخلص من التوافقيات ذات الدرجات
الثالثة ومضاعفاتها المفردة في منحنى الضغط ، كما سبق شرحه .

موجات الاسنان (Tooth ripples) :

تتوقف قيمة القوة الدافعة الكهربائية المرحلية التي تعطيها الآلة على عدد الخطوط
المغناطيسية التي يمشيها كل قطب في الثغرة الهوائية للآلة ، كما يتوقف شكل
منحنى الضغط المرحلي على شكل منحنى كثافة الخطوط المغناطيسية على مدى
الخطوة القطبية في هذه الثغرة . وقد سبق أن ذكرنا أن منحنى القوة الدافعة
المغناطيسية للملفات التنبيهية ، ذات الترتيب الثابت على الاقطاب المغناطيسية ،
يكون ذا شكل ثابت ومحدد ، يتوقف على شكل الاقطاب وطريقة تزويدها
بملفات التنبيه ، كما هو مبين في شكل (٤-٢) ، (٥-٢) . وخرجنا من هذا
كله باتخاذ شكل معين لمنحنى توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية
للآلة ، يتوقف على طول هذه الثغرة عند النقط المختلفة على مدى الخطوة القطبية .

ثم حددنا توافقيات الضغط في منحنى الضغط المرحلي بناء على هذا الشكل . وعلى الرغم من أن العامل الحاسم في تحديد شكل منحنى الضغط المرحلي ، في هذه العمليات المتعاقبة ، هو تغير طول الشفرة الهوائية ، التي تتركز فيها المقاومة المغناطيسية على مدى الخطوة القطبية ، فقد أهملنا عاملا مؤثرا في هذا المضمار ، عندما اعتبرنا أن طول الشفرة الهوائية هو المسافة المقاسة في هذا الاتجاه نصف القطرى بين وجه القطب والسطح الداخلى للمنتج ، كما هو مبين في شكل (٨ - ٢) . ذلك لأن تحديد



شكل (٨ - ٢)

طول الشفرة الهوائية على هذا الأساس يعتبر صحيحا إذا كان سطح المنتج هذا من الحديد الخالص ، ولا تتعاقب فيه الاسنان والمجاري كما هو حادث فعلا .

لهذا كله ينبغي عمل تصحيح معين في منحنى الضغط يكون باضافة توافقية ضغط جديدة اليه ، وهى التى تنتج بسبب التوافقية المستحدثة في منحنى توزيع خطوط القوى المغناطيسية فى الشفرة الهوائية ، الناشئة عن التذبذب فى قيمة

المقاومة المغناطيسية عند النقط المختلفة في هذه الشفرة ، بسبب تواجد هذه النقط أمام الاسنان في أماكن معينة على مدى الخطوة القطبية ، وتواجدها أمام المجارى في أماكن أخرى . يطلق على التوجعات الناشئة في منحني توزيع خطوط القوى المغناطيسية في هذه الحالة اسم تموجات الاسنان ، وتكون قيمة التغير في الضغط المرحلى للآلة بسببها طفيفة جدا لا تذكر ، بحيث يمكن اهمالها على الدوام . ولكن خطورة وجود ترافقيات الضغط ، الناتجة عن هذه التوجعات ، في منحني الضغط ، تأتي من أنها ذات تردد كبير نسبيا ، مما يجعلها تسبب في احداث أصوات مزعجة (طنين أو ضجة) في أجهزة التليفون التي تمتد خطوطها بجوار خطوط نقل القدرة الكهربائية التي يغذيها المولد . ويكون ذلك بسبب التيارات المنتجة بالتأثير في خطوط التليفون ، بفعل التيارات التي تمررها توافقيات الضغط ذات التردد العالي في خطوط نقل القدرة الكهربائية . ويمكن تحديد قيمة هذا التردد العالي ، الذي يطلق عليه اسم تردد ضغط الاسنان على النحو التالي :

تمتد الذبذبة الواحدة في توافقية القوة الدافعة المغناطيسية الأساسية (التي ترددها f ذبذبة في الثانية) في الشفرة الهوائية على مدى خطوتين قطبيتين كاملتين من سطح العضو الدائر . ونظرا لأن الحركة الدائرية بين المنتج والمجال المغناطيسي هي التي يعول عليها بالنسبة لتحديد التردد ، فإننا نستطيع ، للحصول على النتيجة النهائية ، أن نعتبر أن المنتج هو الذي يدور (في الاتجاه العكسي) بالسرعة n_s ، وأن الأقطاب ثابتة . وفي هذه الحالة نجد أن أية نقطة في الشفرة الهوائية يمر عليها بالتعاقب عدد من الاسنان أو المجارى مقداره $6q$ (وهو ما يساوى عدد المجارى على مدى خطوتين قطبيتين كاملتين) مقابل ذبذبة واحدة في توافقية القوة الدافعة المغناطيسية الأساسية ، وذلك عندما عندما تكون q عددا صحيحا . ونظرا لأن

مرور سنة ويجرى معا عبر النقطة المذكورة يؤدي إلى عمل دورة كاملة في تموجات الاسنان ، فان هذا يعنى أن تردد هذه التموجات ، وهو ما نرمز اليه بالرمز f_s ونطلق عليه اسم تردد تموجات الاسنان ، يساوى $6qf$ ذبذبة في الثانية ، حيث f هو التردد الاساسى بالذبذبة في الثانية ، أى أن :

تردد تموجات الاسنان $f_s = f \times$ عدد المجارى لكل زوج أقطاب $6q$. يقل التأثير الناشئ عن تموجات الاسنان ، بسبب انخفاض مقدار التغير فى المقاومة المغناطيسية للشجرة الهوائية الناتج من وجود المجارى ، إذا كانت q عددا كسريا وهذا يبين فائدة جديدة لإستخدام الملفات كسرية الجرى . ونظراً لأن المقاومة المغناطيسية للشجرة الهوائية فى مقابل وجه القطب تتوقف فى الواقع على مساحة حديد الاسنان المحصور بين طرفى القطب . فانه يمكن تقليل التغير فى قيمة هذه المقاومة باتخاذ علاقة معينة بين خطوة السنة وعرض حذاء القطب . ولكننا لا نتوقع أن يؤدي ذلك إلى الغاء تموجات الاسنان ، بسبب المفقودات الحديدية التى تحدث فى حديد الاسنان .

إذا اعتبرنا أن الفيض المغناطيسى الاساسى هو ϕ_1 ، ولا يوجد معه سوى الفيض الناشئ عن تموجات الاسنان ، ونرمز اليه بالرمز ϕ_s ، تكون القيمة اللحظية للفيض المغناطيسى المتسلسل (linked with) مع ملفات المنتج هى :

$$\begin{aligned} \phi &= (\phi_1 + \phi_s \sin 2\pi f_s t) \cos 2\pi f t \\ &= \phi_1 \cos 2\pi f t + \frac{1}{2} \phi_s [\sin 2\pi (f_s - f) t \\ &\quad + \sin 2\pi (f_s + f) t] \end{aligned}$$

وتكون القوة الدافعة الكهربائية التى ينتجها هذا الفيض المغناطيسى هى :

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \text{ V} = 2\pi f N \phi_1 \sin 2\pi f t \times 10^{-8}$$

$$= \frac{\phi_s N}{2 \times 10^8} [2\pi (f_s - f) \cos 2\pi (f_s - f)t$$

$$+ 2\pi (f_s + f) \cos 2\pi (f_s + f)t]$$

وهذا يعنى أن تموجات الاستان تودى إلى وجود توافقيتين فى منهجنى الضغط احدهما بالتردد $(f + f_s)$ أى $f(6q + 1)$ والاخرى بالتردد $(f_s - f)$ أى بالتردد $f(6q - 1)$

امثلة محاولة على البابين الاول والثانى

- (1) a 3 - phase, 16 pole alternator has a star connected winding with 144 slots and 10 conductors per slot. The flux per pole is 3 megalines, sinusoidally distributed and the speed is 375 r.p.m. i) Sketch the winding arrangement over 4—pole pitches, indicating the number of coil groups in each phase and the starts of the phases if the winding is single layer concentric with two plane end connections; ii) Find the frequency and the phase and line e.m.f.s.

i) بالنسبة لرسم الملفات :

$$q = \frac{S}{3 \times 2p} = \frac{144}{3 \times 16} = 3 \quad \text{مجرى لكل مرحلة/قطب}$$

$$\alpha' = \frac{360 F}{S} = \frac{360 \times 8}{144} = 20 \quad \text{درجة كهربائية}$$

$$\alpha = \frac{360 p}{S} = \frac{360 \times 8}{144} = 20 \quad \text{درجة كهربائية}$$

نرسم مخطط متجهات المجارى ، وسوف نجد انه يحتوى على 18 متجه في الدورة الواحدة ، ويتكون من ثمانى دورات ، تمثل كل دورة منها جوانب الملفات تحت قطبين . لذلك نكتفى بدورتين فقط لرسم الملفات تحت أربعة أقطاب ويتبين لنا من هذا أن الآلة يمكن أن توصل على نمط الالف الانطباقي المعروف فى آلات التيار المستمر ، فتحوى على ثمانية مسارات متوازية ، بعدد أزواج الأقطاب (قارن بشكلى (١٦-١ب) ، (١٧-١ب)) . ويكون توصيل الملفات كما هو مطلوب ، على نمط شكل (١-٤) (مخطط متجهات المجارى (٣-١أ)) ، غاية ما فى الأمر أن $q = 3$ فى هذه الحالة ، بينما $q = 2$ بالنسبة لشكل (١-٤) .
نحصل على عدد مجموعات الملفات فى كل مرحلة على النحو التالى :

عدد الملفات فى كل مجموعة ملفات تحت قطبين ($q = 3$) $= 3$

عدد مجموعات الملفات فى كل مرحلة $= p = 8 = 8$

∴ عدد الملفات فى كل مرحلة $= 8 \times 3 = 24$ ملف

وحيث أن عدد الموصلات فى كل مجرى $= 10$ موصل

∴ عدد الالفات فى كل ملف $= 10$ لفة

(يطلق على عدد الالفات فى الملف الواحد أحيانا عدد الدورات ، حيث تناظر الدورة لفة واحدة) .

∴ عدد الالفات فى كل مرحلة : لفة $240 = 10 \times 24 = T_{ph}$

ويمكننا الحصول على نفس هذه النتيجة باستخدام المعادلة (٢-١) :

$$T_{ph} = \frac{uS}{6} = \frac{10 \times 144}{6} = 240 \text{ turns}$$

$$\text{ii) } f = \frac{p n_s}{60} = \frac{8 \times 375}{60} = 50 \text{ c/s}$$

$$k_d = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 30}{3 \sin 10} = 0.96 \quad \text{معامل التوزيع :}$$

$k_c = 1$ (المعامل الوترى : لعدم وجود تقصير في خطوة الماك)

$$k_w = k_d \times k_c = 0.96 \quad \text{معامل الك}$$

$$\begin{aligned} E_{ph} &= 4.44 f \phi T_{ph} k_w \times 10^{-8} \\ &= 4.44 \times 50 \times 3 \times 10^6 \times 240 \times 0.96 \times 10^{-8} \\ &= 1534 \text{ V} \end{aligned}$$

$$E_L (\text{الضغط الخطي}) = \sqrt{3} E_{ph} = 2655 \text{ V}$$

- (2) Determine the root — mean — square value of the individual harmonic components and of the total induced e.m.f. per phase of a 50 c/s, 3 — phase, alternator from the following data : no. of poles = 10, slots per pole per phase = 2. Conductors per slot (double layer) = 4, coil span = 150° . Flux per pole (fundamental) 12 megalines. The analysis of the gap flux density shows a 20 % third harmonic, 12 % fifth harmonic and 8 % seventh harmonic. All coils of a phase are connected in series. Find also the Value of the line Voltage when the alternator is connected in star. If the armature winding has a resistance of 2 ohms and an inductance of 40 m H. per phase, calculate the circulating current inside the delta connected windings and the phase voltage on open circuit.

باستخدام المعادلات (٢-١١)، (٢-١٢)، (٢-١٣) نجد أن :

$$k_{d1} = \frac{\sin 30}{2 \sin 15} = 0.966, k_{c1} = \cos 15 = 0.9659$$

$$(\alpha = \frac{360 \times 5}{2 \times 3 \times 10} = 30^\circ, \theta = 180 - 150 = 30^\circ)$$

$$k_{d3} = \frac{\sin 3 \times 30}{2 \sin 3 \times 15} = 0.707,$$

$$k_{c3} = \cos 3 \times 15 = 0.707$$

$$k_{d5} = \frac{\sin 5 \times 30}{2 \sin 5 \times 15} = 0.2585,$$

$$k_{c5} = \cos 3 \times 15 = 0.2588$$

$$k_{d7} = \frac{\sin 5 \times 30}{2 \sin 7 \times 15} = -0.5285,$$

$$k_{c7} = \cos 7 \times 15 = -0.2588$$

$$E_1 = 4.44 \times 50 \times 12 \times 10^6 \times 40 \times 0.966 \times 0.9659 \\ \times 10^{-8} = 995 \text{ V}$$

$$(T_{ph} = \frac{4 \times 2 \times 3 \times 10}{2 \times 3} = 40)$$

$$E_3 = 4.44 \times 3 \times 50 \times (0.2 B_1 I_i \frac{\tau_p}{3} \times \frac{2}{\pi})$$

$$\times 40 \times 0.707 \times 0.707 \times 10^{-8}$$

$$= 4.44 \times 50 \times 0.2 \times 12 \times 10^6 \times 40 \times 0.707$$

$$\times 0.707 \times 10^{-8} = 106.5 \text{ V}$$

$$E_5 = 4.44 \times 50 \times 0.12 \times 12 \times 10^6 \times 40 \times 0.2585 \\ \times 0.2588 \times 10^{-8} = 8.56 \text{ V}$$

$$E_7 = 4.44 \times 50 \times 0.08 \times 12 \times 10^6 \times 40 \times 0.2585 \\ \times -0.2588 \times 10^{-8} = 5.7 \text{ V}$$

$$E_{ph} = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + E_7^2} \\ = \sqrt{(995)^2 + (106.5)^2 + (8.56)^2 + (5.7)^2} \\ \approx 1000 \text{ V}$$

الضغط الخطي لتوصيل نجمة : (باستخدام) المعادلة (١٨-٢) نجد أن :

$$\text{star connection : } E_L = \sqrt{3} \sqrt{E_1^2 + E_5^2 + E_7^2} = 1725 \text{ V}$$

لحساب تيار القصر داخل الدلتا نستخدم المعادلة (١٩-٢) حيث :

$$R_a = 2 , \quad x_a = \omega L = 314 \times 0.04 = 12.56 \text{ ohms}$$

$$I_3 = \frac{E_3}{\sqrt{R_a^2 + (3x_a)^2}} = \frac{106.5}{3.77} \approx 2.83 \text{ amps.}$$

الضغط المرحلي يساوي الضغط الخطي عند توصيل دلتا ، حيث :

$$E_{ph} = E_L = \sqrt{3} \sqrt{E_1^2 + E_5^2 + E_7^2} = 1725 \text{ V}$$

- (3) Design the armature winding of a synchronous machine having 4 poles and 30 armature slots. Make a scheme of the winding, showing the connections between the coil groups and the starts and finishes of the phases, for the two cases of : i) single layer with end connections arranged in two planes ; ii) double layer winding with a coil span of 6 slot pitches.

Calculate in each case the Winding factor.

سبق حل هذه المسألة بالنسبة لعمل التخطيط للملفات مفردة الطبقة ، كما هو مطلوب في (i) ، وايضاح التوصيلات بين مجموعات الملفات فى المراحل المختلفة ، كما جاء فى شكل (٢٠-١ ب) ، وذلك بمساعدة مخطط نجمة المجارى فى شكل (٢٠-١ أ) . بالنسبة لما هو مطلوب فى (ii) نقوم أولا بترتيب جوانب الملفات فى الطبقة العلوية بنفس الطريقة التى اتبعت فى (i) ، كما سبق ذكره فى الباب الاول بالاشارة إلى شكل (٢٢-١ أ ب) ، ثم ترتب جوانب الطبقة السفلية على نفس النمط ، ابتداء من المجرى رقم ٧ (لى يكون اتساع الملف 6 مجارى كما هو مطلوب) ، وذلك كما فعلنا فى الشكلين المذكورين . غاية ما فى الامر أن ترتيب جوانب الملفات فى الطبقة العلوية يختلف اختلافا طفيفا عما جاء فى شكل (٢٠-١ ب) ، حيث كانت مجموعات الملفات تحتوى على أعداد مختلفة من الملفات ، هى كما جاء فى هذا الشكل 3 — 3 — 2 — 2 — 3 — 2 — 2 — 2 — 3 — 3 — 2 — 2 ، وقد كان هذا ضروريا لى يمكن تنفيذ اللف ، بينما يمكننا فى حالة اللف مزدوج الطبقة جعل مجموعات الملفات فى الطبقة العلوية تحتوى على أعداد من الملفات ، هى بالترتيب 3 — 2 — 3 — 2 — 3 — 2 — 3 — 2 — 3 — 2 — 3 — 2 ، فيكون اللف أكثر تماثلا . ويكون ترتيب مجموعات الملفات فى الطبقة السفلية على نفس الوتيرة ، بطبيعة الحال ، مع الابتداء فى المجرى رقم 7 ، كما حدث فى الحالة السابقة بالضبط .

بالنسبة لحساب معامل اللف : (أولا) فى حالة اللف مفرد الطبقة ، وكذلك فى حالة اللف مزدوج الطبقة يحسب معامل التوزيع k_d على أساس $q' = b$ ، كما سبق شرحه فى الباب الثانى حيث :

$$q = \frac{30}{3 \times 4} = \frac{5}{2} = \frac{b}{C} , \quad q' = b = 5$$

$$\alpha' = \frac{360 p}{q' \times 3 \times 4} = \frac{360 \times 2}{5 \times 3 \times 4} = 12^\circ$$

$$k_w = \frac{\sin \frac{q' \alpha'}{2}}{q' \sin \frac{\alpha'}{2}} = \frac{\sin 30}{5 \sin 6} = 0.956$$

بالنسبة للتوافقية الفراغية ذات الدرجة γ نجد أن :

$$k_{w\gamma} = \frac{\sin \frac{q' \alpha' \gamma}{2}}{q' \sin \frac{\alpha' \gamma}{2}}$$

(ثانياً) بالنسبة للف مفرد الطبقة نجد أن اتساع الملفات يختلف ما بين 7 مجارى و 8 مجارى ، كما يتضح من شكل (٢٠ - ب) ، فإذا اعتبرنا أن الخطوة القطبية تسع 7.5 (= 3 × 2.5) مجرى ، فإن هذا يعنى أن اتساع الملف يقل أو يزيد بمقدار نصف مجرى عن الخطوة القطبية ، وهذا يؤدي إلى إعطاء معامل وترى بزاوية تقصير θ تساوى الزاوية المكافئة لنصف المجرى ، أى أن :

$$k_c = \cos \frac{\theta}{2} = \cos \frac{\alpha}{4} = \cos \frac{360 \times 2}{30 \times 4} = 0.9945$$

$$k_w = k_d \cdot k_c = 0.956 \times 0.9945 = 0.95$$

(ثالثاً) بالنسبة للف مزدوج الطبقة نجد أن θ تنتج باستخدام المعادلة

(٢-٤) ، حيث :

$$y = 6 , \quad 3q = 7.5 , \quad \theta = \frac{1.5}{7.5} \times 180 = 36^\circ$$

$$k_c = \cos 18 = 0.9511$$

$$k_w = k_d \times k_c = 0.956 \times 0.9511 = 0.91$$

وتكون $k_{c\gamma} = \cos \gamma \frac{\theta}{2}$ في الحالتين .

(4) The flux density distribution curve in the air gap of a 50 c/s 3-phase synchronous generator is :

$$B = 11.5 \sin \theta + 2.5 \sin 3 \theta - 2 \sin 5 \theta - 1.5 \sin 7 \theta \text{ kilo gauss}$$

where θ is measured from the neutral axis. The pole pitch is 40 cms and core length 34 cms. The machine has 12 slots per pole each containing 6 conductors. The Winding is double layer, with a phase spread of 60 degrees, and each coil spans 120 degrees. If the generator is driven at a speed of 750 r.p.m., determine the equation of the e.m.f. induced in each phase and its effective Value.

من معادلة متحنى كثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية نجد أن :

$$B_1 = 11500 , B_3 = 2500 , B_5 = -2000 ,$$

$$B_7 = 1500 \text{ gauss}$$

$$p = \frac{60 \times 50}{750} = 4 , 2p = 8 , S = 12 \times 8 = 96$$

$$\alpha = \frac{360 \times 4}{96} = 15^\circ , \theta = 180 - 120 = 60^\circ$$

يكون اتساع الملف 8 مجارى ، ونظراً لأن زاوية الانتشار المرحلي 60 درجة

نجد أن :

$$T_{ph} = \frac{96 \times 6}{6} = 96 , \quad q = \frac{12}{3} = 4$$

باستخدام المعادلات (١١-٢) و (١٢-٢) و (١٣-٢) نجد أن :

$$k_{d1} = \frac{\sin 30}{4 \sin 7.5} = 0.957 , \quad k_{c1} = \cos 30 = 0.866$$

$$k_{d3} = \frac{\sin 3 \times 30}{4 \sin 3 \times 7.5} = 0.653 , \quad k_{c3} = \cos 3 \times 30 = 0$$

وهذا يعنى اختفاء التوافقية الثالثة من منحنى الضغط بسبب تقصير اتساع الملف

بالزاوية $\theta = 60^\circ$ مما أدى إلى حصولنا على $\frac{n \times 60}{2} = 90$ بحيث تكون قيمة $n = 3$. ويمكن توصيل المراحل دلتا في هذه الحالة ، دون الخوف من مرور تيار تيار قصر داخل الدلتا . ولعل هذا هو السبب في تقصير اتساع الملفات على هذا النحو .

$$k_{d5} = \frac{\sin 5 \times 30}{4 \sin 5 \times 7.5} = 0.205 ,$$

$$k_{c5} = \cos 5 \times 30 = - 0.866$$

$$k_{d7} = \frac{\sin 7 \times 30}{4 \sin 7 \times 7.5} = - 0.1572 ,$$

$$k_{c7} = \cos 7 \times 30 = - 0.866$$

$$\Phi_1 = 11500 \times 34 \times 40 \times \frac{2}{\pi} = 9.95 \times 10^6 \text{ lines}$$

$$\Phi_5 = - 2000 \times 34 \times \frac{40}{7} \times \frac{2}{\pi} = - 0.577 \times 10^6 \text{ lines}$$

$$\Phi_7 = - 1500 \times 34 \times \frac{40}{7} \times \frac{2}{\pi} = - 0.186 \times 10^6 \text{ lines}$$

$$f_1 = 50 , f_5 = 250 , f_7 = 350 \text{ c/s}$$

$$E_1 = 4.44 \times 50 \times 96 \times 9.95 \times 10^6 \times 0.957 \times 0.866 \\ \times 10^{-8} = 1760 \text{ V}$$

$$E_5 = 4.44 \times 250 \times 96 \times -0.577 \times 10^6 \times 0.205 \times \\ -0.866 \times 10^{-8} = 109 \text{ V}$$

$$E_7 = 4.44 \times 350 \times 96 \times -0.186 \times 10^6 \times -0.1572 \times \\ -0.866 \times 10^{-8} = -37.7 \text{ V}$$

وتكون معادلة الضغط المرحلي ، كدالة للزمن ، بالنسبة للمرحلة الاولى ،
بتطبيق المعادلة (١٧-٢) هي :

$$e_1 = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t + \sqrt{2} E_3 \sin 3\omega t + \sqrt{2} E_5 \sin 5\omega t \\ + \sqrt{2} E_7 \sin 7\omega t$$

$$E_3 = 0 , 2\pi f_1 \omega = 314 \text{ حيث}$$

$$e_1 = 2485 \sin 314 t + 154 \sin 1570 t - 53.3 \sin 2198 t \text{ V}$$

لكي نحصل على e_2 نضع ($\omega t - 120$) بدلا من ωt في معادلة e_1 ولكي
نحصل على e_3 نضع ($\omega t - 240$) أو ($\omega t + 120$) بدلا من ωt في
معادلة e_1 ونحصل على القيمة الفعالة للضغط المرحلي من المعادلة :

$$E_{ph} = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + E_7^2} \approx 1726 \text{ V}$$

مسائل على الجانبين الاول والثاني

- 1 — Draw the single layer Winding arrangements, with the overhangs arranged in two or three endplanes, as would be necessary, for the following 3 — phase alternating current machine stators, with phase spread of 60° .

$$a - q = 3, \quad 2p = 6$$

$$b - q = 2, \quad 2p = 10$$

$$c - q = 2 \frac{1}{4}, \quad 2p = 8$$

$$d - q = 2 \frac{2}{5}, \quad 2p = 20$$

$$e - q = 2 \frac{1}{8}, \quad 2p = 16$$

Calculate the winding factor in each case and indicate the starts and finishes of the 3 phases.

2 — Draw the double layer lattice winding arrangements for the following 3 — phase alternating current machine stators :

a — $q = 3$, $2p = 4$, phase spread 120° and full pitch coils

b — $q = 3$, $2p = 4$, phase spread 60° with chording $\frac{1}{3}$ of the pole pitch

c — $q = 2 \frac{1}{2}$, $2p = 4$, phase spread 60° with coil span of 6 slots.

Calculate the winding factor in each case and indicate the starts and finishes of the 3 phases.

3 — Calculate the coil span factor & distribution factor for a 3 phase machine with 24 slots per pole, the winding of which is double layer with 2 conductors per slot & is chorded by 2 slots.

4 — A 3 phase, star connected, 12 pole, 50 cycle/second alternator has 12 slots per pole & 4 conductors per slot.

The coils are short chorded by one slot & all the coils of a phase are connected in series. The fundamental flux per pole is 10×10^6 and there is also a 20 % 3rd harmonic & 10 % fifth harmonic.

Determine the R. M. S. V. of the total o. m. f. & of fundamental, 3rd and 5th. harmonics components both in phase & line.

- 5 — The stator of an alternator has 6 slots/pole pitch & is wound either as : a — single phase machine with winding occupying 4 slots/pole pitch only. b — or single phase machine with the winding occupying all slots. c — or two phase machine. d — or 3 phase machine.

Find the spread factor of the winding in each case. Compare the rating of the machines & the copper used for different kinds of the winding. Assume the same current in each case & take the 3 phase as 100%.

- 6 — The flux distribution in the air gap of a 50 cycle/second salient pole alternator may be taken as rectangular, the base being $\frac{2}{3}$ of the pole pitch. Calculate the R. M. S. V. of the fundamental phase e. m. f. The following particulars are given : 20 pole 12 slots/pole, 3 conductors/slot, phase spread 60° , pole pitch 50, stator length 75 cms., max. flux density in air gap 7000 lines/cm². Find also the phase e. m. f. if the total same flux had a sinusoidal distribution.

- 7 — The flux density in the air — gap of a 3 — phase 4 — pole alternator varies circumferentially according to the following expression

$$B_{\theta} = B_1 \sin \theta - B_5 \sin 5\theta - B_7 \sin 7\theta$$

where $B_1 = 0.7 \text{ wb/m}^2$, $B_5 = \frac{1}{5} B_1$, and $B_7 = \frac{1}{7} B_1$,

and θ from 0 to 2π covers the double pole—pitch

There are 2 slots per pole per phase and the armature coils are short — chorded one slot pitch. The effective length of conductor is 0.5 m and the peripheral speed of the rotor is 50 m/sec. Each coil has 10 turns. Determine the relative amplitudes of the fundamental and harmonics in the generated phase e. m. f. .

- 8 — An 8 — pole, three — phase, 50 — c/s alternator has four slots per pole per phase. The winding is of single — layer full — span coils, and there are 12 turns per coil. The coils of each phase are connected in series to form the phase winding. The air — gap flux density is distributed circumferentially according to the expression :

$$B_{\theta} = B_1 [\sin 5\theta - 0.15 \sin 7\theta] ,$$

π representing the full pole—pitch. The fundamental flux per pole is 0.025 wb. calculate the r. m. s. phase voltage of : (a) the fundamental, (b) the fifth harmonic and (c) the seventh harmonic. Prove any formula used for the winding factor.

- 9 — The phase voltage of a 750 KW, 2200 V, 3 — phase 50 cycles alternator has a 5% third — harmonic.

what is the circulating current on normal voltage, if the machine is mesh — connected? The resistance and reactance per phase are 0.25Ω and 0.7Ω respectively. Express the loss due to the circulating current as a percentage of full — load output.

10 — show that when a 3 — phase alternator is star — connected no electromotive force of triple frequency or multiple thereof appears in the line voltage. If the phase voltage of a star — connected, 3 — phase alternator contains a fundamental of 200 V amplitude, and 3 rd, 5 th, 7 th, and 9 th order harmonics of 40 — 25 — 20 and 10 — V amplitude respectively, calculate the ratio of line to phase voltage.

11 — The wave — form of the phase voltage of a 3 — phase, star — connected alternator is as follows :

Time — angle, deg	0	18	36	54	72	90	108	126
voltage, V	0	700	750	780	1250	1600	1250	730

Draw the line — voltage wave and obtain the value of its 5 th harmonic.

12 — The phase — e. m. f. wave of a 3 — phase alternator consists of a fundamental and a 30 % third harmonic. If the amplitude of the fundamental is 3100 V, calculate the r.m.s. value of the line voltage when the windings are connected (a) in star, (b) in mesh. If the leakage reactance of each phase is 10.0Ω at 50 cycles, determine (c) the circulating current in case (b). Neglect resistance.

13 — A 16 — pole, 3 — phase alternator has 144 slots.

The winding is short — chorded by 1 slot — pitch and star — connected. Assuming a field form of $100 \sin \theta + 25 \sin 3 \theta + 20 \sin 5 \theta$, find the harmonics in (a) the phase voltage, (b) the line voltage, as a percentage of the fundamental. Determine also the phase and line R.M.S. values as a percentage of the fundamental.

الباب الثالث

رد فعل المنتج ومعامل التنظيم في الآلات المتزامنة

Armature reaction and Voltage regulation in synchronous
Machines

أولاً - رد فعل المنتج والمجال المغناطيسي الدائر

(Armature reaction and rotating magnetic field)

المجال المغناطيسي الناشئ عن ملفات المنتج للاثبات المراحل :

يؤدي مرور التيارات المرحلية في ملفات المنتج إلى ظهور تأثيرات مغناطيسية حولها ، هي ما اصطلح على تسميته برد فعل المنتج ، كما سبق شرحه بالتفصيل ، بالنسبة لآلات التيار المستمر ، في الباب السادس من كتاب هندسة الآلات الكهربائية . وسوف نتبع ، في سبيل الحصول على توزيع المجال المغناطيسي الناشئ عن ملفات المنتج في الآلات المتزامنة ، نفس الوسيلة التي اتبعناها في هذا الباب ، من حيث تحديد التيارات ، المارة في الموصلات التي تحتوي عليها هذه الملفات ، في القيمة والانحياز ، ورسم خطوط القوى المغناطيسية التي تنشأ بناء على ذلك في الثغرة الهوائية . وما يتصل بها من مسارات ، ثم الحصول على المجال المغناطيسي المحصل في هذه الثغرة على هذا الاساس . ولكن يجب أن نراعى أن حالة الآلات المتزامنة تختلف عن حالة آلات التيار المستمر ، في هذا المضمار ، من ناحيتين جوهريتين ، وهما :

١ - أن الملفات في حالة الآلات المتزامنة تنقسم إلى ثلاث مراحل ذات

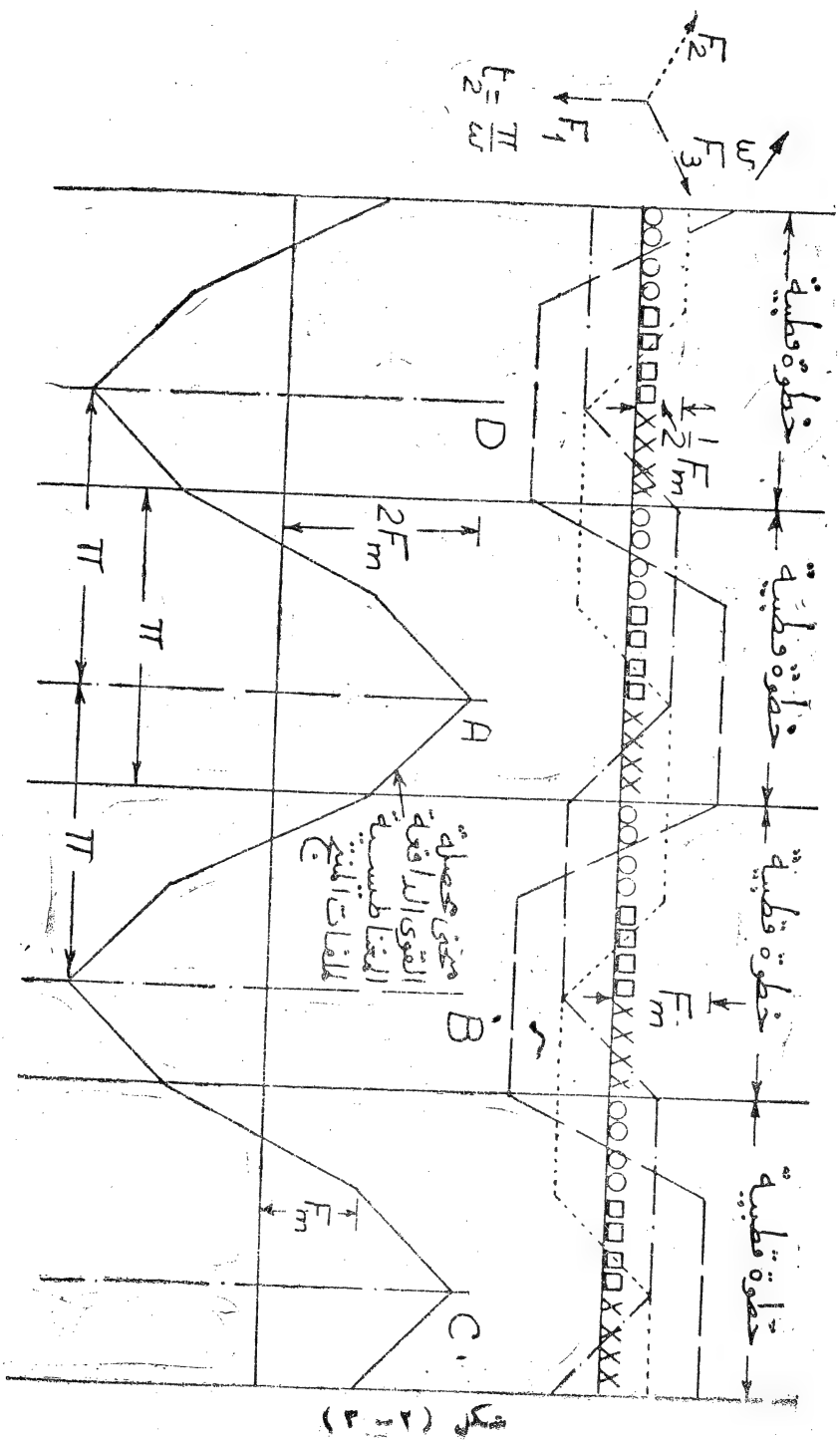
أوضاع معينة في الفراغ بالنسبة لبعضها البعض ، أو بمعنى أصح ذات توزيع فراغى معين ، حيث يوجد بين كل مرحلتين متعاقبتين اختلاف مرحلى فراغى (space phase difference) مقداره 120 درجة كهربيه . وهذا يستدعى منا استعراض المجال المغناطيسى للملفات بأكمله حتى نقف على حقيقة ما يجرى في حالة الآلات المتزامنه ، بينما استطعنا الحصول على كل النتائج التى تعيننا ، فى حالة آلات التيار المستمر ، بدراسة ما يحدث فى قطاع واحد من القطاعات المتماثلة فى الآله تحت قطبين متجاورين .

٢ - أن التيارات المسارة فى الملفات ثلاثية المراحل هى الأخرى ثلاثية المراحل ويوجد بين كل اثنين منها اختلاف مرحلى زمنى (Time phase difference) يناظر 120 درجة كهربيه . وهذه التيارات مترددة تتغير من لحظة لأخرى بصورة دورية ، أى أنها دوال للزمن . لذلك يجب أن نراعى تحديد اللحظة التى نستعرض فيها شكل وقيمة المجال المغناطيسى ، وأن نفعل ذلك فى لحظات مختلفة ، حتى نستطيع أن نعرف كيف يتغير هذا المجال ، تبعاً لتغير التيارات مع الزمن .

يبين شكل (١ - ٢) المجالات المغناطيسية حول جوانب الملفات فى الآلة المتزامنة ، وهى مرسومة بنفس الطريقة التى اتبعت فى رسم شكل (١ - ٦) ، (٢ - ٦) فى كتاب هندسة الآلات الكهربيه ، آلات التيار المستمر (ص ٢٩١ - ص ٢٩٥) ، مع اعتبار أن اللحظة التى يتم فيها تحديد شكل المجال المغناطيسى هى تلك التى تكون فيها قيمة التيار فى المرحلة الأولى فى نهايتها العظمى الموجبة . فإذا كانت القيمة الفعالة للتيار المرحلى هى I أمبير ، وعدد الموصلات فى كل جرى من مجارى المنتج هو u ، وعدد المجارى لكل مرحلة تحت كل قطب هو q ،

نجد أن القوة الدافعة المغناطيسية لمجموعة الملفات التي عددها q في المرحلة الأولى، وهي التي تقع أمام قطبين مختلفين ومقتالين، يكون مقدارها $I \times \sqrt{2} \times \frac{U}{2} q$ أمبير لكل قطب، وهي تناظر القيمة $\frac{I_c Z}{4p}$ في شكل (١-٦)، (٢-٦)، التي سبقت الإشارة إليها. هذا على أساس أن القوة الدافعة المغناطيسية، الناشئة عن الملفات الموزعة في q من الجارى المتجاورة، تساوى تلك التي نحصل عليها باعتبار الموصلات في مجرى واحد مضروبة في عدد الجارى q . فاذا راعينا أن القوة الدافعة المغناطيسية مقدار موجه (Vector quantity) مثل للقوة الدافعة الكهربائية تماما، نجد أنه يجب علينا استخدام نفس معامل التصحيح، وهو معامل اللب k_w ، الذي استخدمناه في معادلة القوة الدافعة الكهربائية المرحلية، في تعيين قيمة القوة الدافعة المغناطيسية لمجموعة الملفات q لكل قطب، فتصبح $I k_w \times \sqrt{2} \times \frac{U}{2} q$. وهذه هي القيمة F_m بالأمبير لفات، التي يمثلها كل من المتجهات F_1 ، F_2 ، F_3 في شكل (١-٣)، وهي عبارة عن قيمة النهاية العظمى للقوة الدافعة المغناطيسية بالأمبير لفات لكل قطب التي تعطىها مجموعة ملفات المرحلة الواحدة تحت كل قطبين مقتالين ومختلفين في القطبية، في اتجاه محور هذه الملفات، في اللحظة التي تكون قيمة القوة الدافعة المغناطيسية لنفس المجموعة من الملفات عند أية لحظة أخرى t مقاسة من هذه اللحظة هي $F_m \cos \omega t$. ولذلك فإن القيمة اللحظية لكل من المتجهين F_2 ، F_3 ، F_1 هي $F_m \cos 120 = -\frac{F_m}{2}$ في اللحظة التي تكون فيها القيمة اللحظية لـ F_1 هي F_m ، كما هو مبين في شكل (١-٣).

تبين الدوائر الصغيرة في شكل (١-٢) الجارى الخاصة بالمرحلة الأولى،



والمربعات الصغيرة المجارى الخاصة بالمرحلة الثانية ، وعلامات \times المجارى الخاصة بالمرحلة الثالثة ، والشكل آلة ذات أربعة أقطاب ، وأربعة مجارى لكل مرحلة تحت كل قطب . وتبين الخطوط المنقطعة منحنيات القوة الدافعة المغناطيسية للمفات المراحل الثلاث فى اللحظة المفروضة ، بينما يبين الخط المتصل محصلة هذه المنحنيات عند نفس اللحظة ، ونحصل عليها بجمع الاحداثيات الرأسية للمنحنيات عند النقط المختلفة حول سطح المنتج .

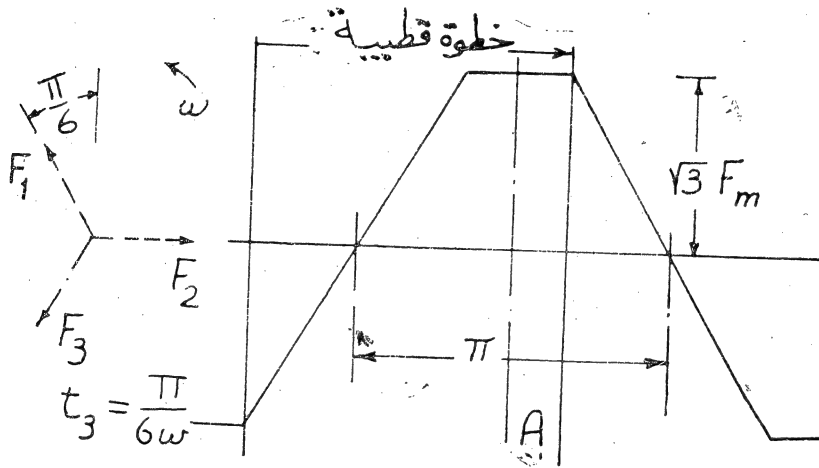
يبين شكل (٣-٢) منحنيات القوة الدافعة المغناطيسية للمفات المراحل الثلاث ومحصلتها فى لحظة t ، تالية للحظة السابقة المرسوم عندها شكل (٣-١) حيث $\omega t = \pi$. تكون القيمة اللحظية للمنتج F_1 فى هذه الحالة هى $F_m \cos(\pi - \frac{2\pi}{3}) = \frac{F_m}{2}$ والقيمة اللحظية للمنتج F_2 هى $F_m \cos \pi = -F_m$ والقيمة اللحظية للمنتج F_3 هى $F_m \cos(\pi + \frac{2\pi}{3}) = \frac{F_m}{2}$ ، وتنبع فى رسم هذا الشكل نفس القواعد التى اتبعت فى رسم الشكل (٣-١) بالضبط .

بدراسة ومقارنة الشكلين (٣-١) ، (٣-٢) تخرج بالنتائج الآتية :

١ - يكون منحنى محصلة القوى الدافعة المغناطيسية للمفات المراحل الثلاث على المنتج ذا شكل منتظم ، بحيث يمكننا اعتبار وجود مجموعة من الأقطاب المكافئة A, B, C, D عددها يساوى عدد أقطاب الآلة $2p$ (أربعة فى المثال المعطى) ، ويحمل كل منها ملفات تنميه تعطى قوة دافعة مغناطيسية مقدارها $2F_m$ عند محور كل قطب ، وتتغير على مدى الخطوة القطبية تبعاً لشكل المنحنى الذى نحصل عليه ، والذى يمكن تحديد معادلاته بسهولة من الرسم . هذا ويجب ملاحظة أنه على الرغم من أننا قد حصلنا على نفس الشكل للمنحنى عند اللحظتين

، إلا أن شكل المنحنى يختلف عن ذلك في لحظات أخرى. $t_1 = 0$ ، $t_2 = \frac{\pi}{\omega}$

فاذا اعتبرنا مثلاً اللحظة $t_3 = \frac{\pi}{6\omega}$ ، ورسمنا المنحنى باتباع نفس الطريقة السابقة، نحصل على الشكل المبين في شكل (٣-٣). إلا أنه قد تبين أن تحليل



شكل (٣-٣)

فوير المتوالي، للمنحنيات المختلفة التي يمكن أن نحصل عليها في اللحظات المتباينة، يعطى توافقية أساسية ذات اتساع واحد في جميع هذه المنحنيات، نرمل له بالرمز F_A أمبير لفة لكل قطب، حيث:

$$F_A = \frac{3}{\pi} F_m = \frac{3}{\pi} \times \frac{\sqrt{2}}{2} qu Ik_w = 1.35 qu Ik_w \quad (٣-١)$$

فاذا عوضنا عن qu بما يساويها بالنسبة لعدد الألفات في كل مرحلة T_{ph} ،

حيث $T_{ph} = qu p$ نجد أن:

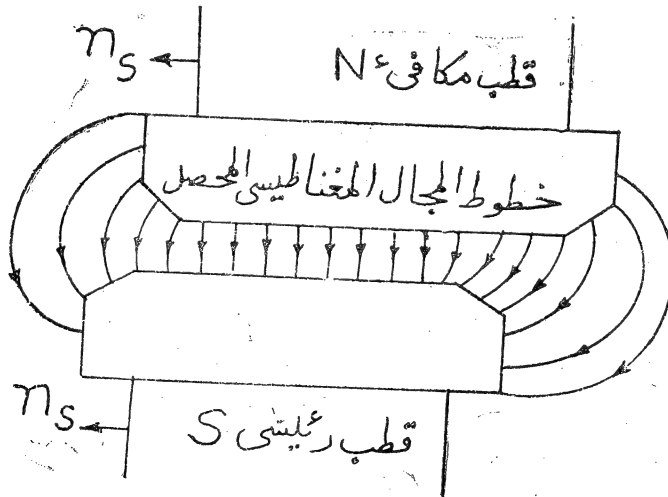
$$F_A = 1.35 \frac{T_{ph}}{p} Ik_w \quad \text{أمبير لفة/قطب} \quad (٣-٢)$$

ويعطى منحنى محصلة القوى الدافعة المغناطيسية للمفات المنتج ، الذى حصلنا عليه فى الأشكال (١-٣) ، (٢-٣) ، (٣-٣) ، توزيع هذه المحصلة على مدى الخطوة القطبية للدول . أى أنه يعطى التوزيع الفراغى (space distribution) للمحصلة ، وذلك عندما يمر فى الملفات ثلاثية المراحل تيارات ثلاثية المراحل متفرقة ، تتغير مع الزمن على منحنيات جيبية (sine curves) . ويحتوى منحنى التوزيع الفراغى لمحصلة القوى الدافعة المغناطيسية للمفات المنتج فى هذه الحالة على توافقيات أساسية وتوافقيات جيبية مفرقة الدرجات (odd sine harmonics) ، لأن المنحنى متماثل حول نقطة الأصل . ويطلق على هذه التوافقيات جميعها اسم التوافقيات الفراغية لمنحنى محصلة القوة الدافعة المغناطيسية للمفات المنتج (space harmonics in the M. M. F. wave of armature reaction) . لذلك يمكننا أن نقول بناء على كل ما سبق أن F_A ، المعطاة قيمتها بالمعادلتين (١-٣) ، (٢-٣) ، هى اتساع التوافقية الفراغية الأساسية لرد فعل المنتج ، بفرض أن التيارات جيبية (sinusoidal) فإذا اعتبرنا أن AT_A هى القيمة المكافئة لرد فعل المنتج بالأمبير لفات لكل قطب ، نكون بذلك قد أهملنا التوافقيات الفراغية غير الأساسية فى منحنى محصلة القوى الدافعة المغناطيسية ، وأهملنا التوافقيات الزمنية غير الأساسية (time harmonics) ، فى منحنى التيار (باعتبار أن المنحنى الجيبى للتيار هو عبارة عن التوافقية الأساسية) . وتستخدم F_A فعلا على هذا الأساس فى حسابات رد فعل المنتج فى الآلات المتزامنة (والآلات التأثيرية أيضا) ، حيث F_A تساوى AT_A عدديا.

٢ - تؤدى التغييرات التى تحدث فى التيارات المرحلية ، نتيجة لمروور زمن

مقداره $t_2 = \frac{\pi}{\omega}$ ، إلى إزاحة محاور الأقطاب المكافئة A , B , C , D ،

التي يتمثل فيها رد فعل المنتج ، زاوية محددة حول محيط المنتج مقدارها π درجة كهربية . فإذا حسبنا سرعة إزاحة هذه الأقطاب على هذا الأساس ، نجد أنها عبارة عن $\omega = \frac{\pi}{t_2}$ ، وهي السرعة الزاوية المناظرة لـ سرعة التزامن n_s ، حيث $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{p n_s}{60}$ (١٣٧ ، ١٣٦) . وهذا ، بالإضافة إلى ما سبق بيانه في ١ ، يعني أننا نستطيع أن نعتبر أن رد فعل المنتج ناشئ عن مجموعة من الأقطاب المكافئة ، عددها يساوي عدد أقطاب الآلة $2p$ ، وتدور هذه الأقطاب المكافئة ، في نفس الاتجاه الذي يدور فيه العضو الدائر ، بنفس سرعة التزامن n_s لفة في الدقيقة . بينما يحمل كل قطب منها ملفات تنبيه ، مكافئة أيضا ، ذات توزيع فراغي للقوة الدافعة المغناطيسية ينطبق على التوافقية الفراغية الأساسية لمنحنى محصلة القوى الدافعة المغناطيسية للمفات المنتج ، المبين في كل من شكل (١-٣) ، (٢-٣) . بذلك نجد أن مجموعة الأقطاب المكافئة لرد فعل المنتج هذه تدور بنفس سرعة التزامن مع الأقطاب



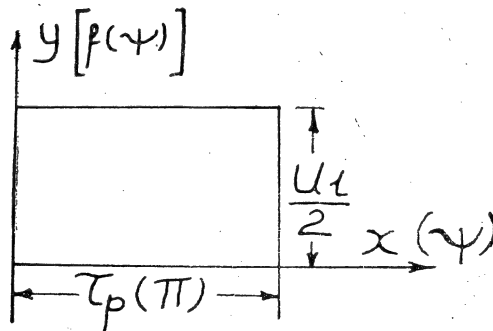
شكل (٣-٤)

الرئيسية على العضو الدائر . ولا شك أن كل قطب من الأقطاب المكافئة يواجه ، أو يرتابط مع (locks With) ، قطب مخالف له في القطبية من مجموعة الأقطاب الرئيسية . ويتم هذا الترابط بوساطة خطوط القوى المغناطيسية التي تخرج من أحدهما وتدخل في الآخر (لإختلافها في القطبية) ، كما هو مبين في شكل (٤ — ٣) . وهذه الخطوط ذات طبيعة مرنة أو مطاطة (elastic lines) يمكن بالتعويل عليها تفسير بعض الظواهر الخاصة بالآلات المتزامنة ، مثل ظاهرة التآرجح (Hunting or oscillations) ، وغيرها من الظواهر التي تدخل في موضوع اتزان (stability) هذه الآلات . وتحدد كثافة هذه الخطوط وتوزيعها ، عند النقاط المختلفة في الشجرة الهوائية للآلة ، على حسب القوة الدافعة المغناطيسية المحصلة التي تنتج من جمع القوى الدافعة المغناطيسية للملفات التنبيه على القطب الرئيسي ، ومحصلة القوى الدافعة المغناطيسية للملفات المنتجة عند كل نقطة ، جمعاً إتجاهياً (vector addition) . ونكتفي في بعض الحالات عند إجراء هذا الجمع بأن نأخذ في الاعتبار التوافقية الفراغية الأساسية في كل من منحنى التوزيع الفراغى للقوة الدافعة المغناطيسية على القطب الرئيسى المبين في شكل (٥ — ٢) أو (٦ — ٢) ، ومنحنى محصلة القوى الدافعة المغناطيسية للملفات المنتجة المبين في شكل (١ — ٣) أو (٢ — ٣) ، وذلك للحصول على منحنى توزيع فراغى جيبي الشكل ، على مدى الخطوة القطبية في الشجرة الهوائية ، للقوة الدافعة المغناطيسية المحصلة فإذا كانت أبعاد الشجرة الهوائية مهيأة على أساس الحصول على توزيع جيبي الشكل لكثافة الخطوط المغناطيسية على مدى الخطوة القطبية في هذه الشجرة ، فإننا نحصل ، بناء على التقريب السابق لإجراء ، على قوة دافعة كهربية تعطينا ضغطاً طرئاً للآلة ذا شكل جيبي ، وذلك عند الحمل الكامل .

التوافقيات الفراغية وعلاقتها بتوافقيات منحنى التيار :

لكي نحصل على صورة واضحة ، وعلاقات رياضية ثابتة ، لجميع الحقائق السابق ذكرها ، بالنسبة للتوافقيات الفراغية وما يتصل بها ، سوف نقوم فيما يلي بتناول الموضوع من الناحية الرياضية ، وتحليل النتائج التي نحصل عليها لمقارنتها بالنتائج السابقة .

نبدأ بفرض أن المنتج يحتوى على مرحلة واحدة من الملفات ، ويجرى واحد لهذه المرحلة ، تحت كل قطب من أقطاب الآلة ، يحتوى كالمعتاد على u من الموصلات ، وأن التيار المار في هذه الموصلات ، وهو تيار مفرد المرحلة (single phase current) ذو قيمة فعالة I ، ويتغير على منحنى جيبى بحيث تكون قيمته اللحظية (instantaneous value) عند أية لحظة t هي $i = \sqrt{2} I \sin \omega t$ ، أى أن منحنى التيار يحتوى على التوافقية الأساسية فقط . يكون منحنى التوزيع الفراغى للقوة الدافعة المغناطيسية للملفات المنتج على مدى الخطوة القطبية τ_p ، عند اللحظة t عبارة عن مستطيل ارتفاعه $\frac{u i}{2}$ أمبير لقوة لكل قطب ، كما هو مبين في شكل (٥-٣) .



شكل (٥-٣)

نحصل على تحليل فوريير المتوالى لهذا المنحنى بالطريقة العادية ، وهو يتكون من جيوب فردية ، لأن المنحنى متماثل حول نقطة الاصل ، فنجد أن :

$$y = F_1 \sin \frac{\pi x}{\tau_p} + F_3 \sin 3 \frac{\pi x}{\tau_p} + \dots$$

$$= \sum_{\gamma=1,3,5,\dots} F_{\gamma} \sin \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \dots \dots \dots (3-2)$$

بوضع $\psi = \frac{\pi x}{\tau_p}$ ، تصبح $f(\psi) = y = \frac{ui}{2}$ من $\psi=0$ إلى $\psi = \tau_p$ ، فيكون :

$$F_{\gamma} = \frac{2}{\pi_0} \int_0^{\tau_p} \frac{ui}{2} \sin \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} d\left(\frac{\pi x}{\tau_p}\right)$$

$$= - \frac{2}{\gamma\pi} \cdot \frac{ui}{2} [\cos \gamma\pi - 1] = \frac{2}{\gamma\pi} ui \dots (3-3)$$

ذلك لأن γ عدد صحيح فردى ، بحيث تكون $\cos \gamma\pi$ تساوى صفراً دائماً .
 بالتعويض عن F_{γ} من المعادلة (3-3) فى المعادلة (3-2) ووضع
 $i = \sqrt{2} I \sin \omega t$

$$y = \frac{\sqrt{2}}{\pi} uI \sum_{\gamma=1,3,5,\dots} \frac{1}{\gamma} \left[\cos \left(\omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right) \right.$$

$$\left. - \cos \left(\omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right) \right] \dots \dots (3-4)$$

تعطى المعادلة (3-4) التوافقية الفراغية الأساسية ، والتوافقيات الفراغية العالية (space fundamental and higher space harmonics) ، فى منحنى التوزيع الفراغى (أو المنحنى الفراغى) للقوة الدافعة المغناطيسية للمفات المنتج

أحادية المراحل ، وذلك عندما يمر فيها تيار مفرد المرحلة ، ذو منحنى زمني (time curve) جيبى الشكل ، أو بمعنى آخر عندما يحتوى المنحنى الزمني للتيار المار في الملفات على توافقيات زمنية أساسية (time fundamental) ، ولا يحتوى على أية توافقيات زمنية عالية (higher time harmonics) . بتحليل هذه المعادلة نحصل على النتائج الآتية :

$$١ - \text{يمثل كل من الحدين } \cos \left(\omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right) , \cos \left(\omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right)$$

موجة سائرة (travelling wave) ذات اتساع مقداره $\frac{\sqrt{2} u I}{\gamma \pi}$ ، ويتواجد هذا الاتساع عند أماكن مختلفة في الأزمنة المختلفة على حسب سرعة سير الموجة. لذلك يمكن تحديد سرعة الموجة بتعيين سرعة سير اتساعها ، ويكون ذلك بتطبيق الشرط الخاص بقيمة اتساع الموجة، الذي يجب أن يسير المسافة x في زمن t ثانية ، بحيث يكون $\cos \left(\omega t \pm \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right)$ يساوى الواحد الصحيح ، $\left(\omega t \pm \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right)$ يساوى صفراً . نجد على هذا الأساس أن سرعة سير التوافقيات التي درجتها γ ، وهى v_γ تنتج على النحو التالي :

$$\left(\omega t \pm \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right) = 0 , \quad x = \pm \frac{\omega t \tau_p}{\gamma \pi} = \pm 2f \tau_p \frac{1}{\gamma} t$$

$$v_\gamma = \frac{x}{t} = \pm \frac{\tau_p}{\gamma} 2f \dots \dots \dots (٢-٦)$$

وهذا يعنى أنه يوجد دائماً توافقتين فراغيتين من الدرجة γ ، إحداهما ذات

اتساع مقداره $\frac{\sqrt{2} u I}{\gamma \pi}$ ، وتسير في الاتجاه الموجب المحور x بالسرعة

$\frac{2f\tau_p}{\gamma}$ ، والثانية ذات اتساع مقداره $\frac{\sqrt{2} u I}{\gamma\pi}$ ، وتسير في الاتجاه السالب للمحور x بنفس السرعة $\frac{2f\tau_p}{\gamma}$.

٢ — إذا لاحظنا أننا حصلنا على المعادلة (٣-٥) باعتبار المنتج المفرد ، وأننا استخدمنا على هذا الأساس المسافة x على المحور الأفقي المفروض ، بدلا من الزاوية ψ على محيط المنتج الواقعى ، نجد أننا يجب أن نعدل السرعة الخطية v_ψ التى حصلنا عليها فى المعادلة (٣-٦) إلى السرعة الزاوية ω_ψ بوضع $\tau_p = \pi$ فى هذه المعادلة ، حيث :

$$\omega_\psi = \pm \frac{1}{\gamma} 2\pi f = \pm \frac{\omega}{\gamma} \dots (٣-٧)$$

٣ — يوجد توافقيتين فراغيتين أساسيتين ($\gamma = 1$) اتساع احدهما $\frac{\sqrt{2} u I}{\pi}$ ، وتسمى التوافقية الأساسية الامامية ، وهى تدور بسرعة التزامن $\left(\omega_1 = 2\pi \frac{p n_s}{60} \right) n_s$ فى اتجاه دوران العضو الدائر ، واتساع الثانية $-\frac{\sqrt{2} u I}{\pi}$ وتسمى التوافقية الأساسية الخلفية ، وتدور بنفس سرعة التزامن n_s فى عكس اتجاه دوران العضو الدائر $\left(\omega_1 = - 2\pi \frac{p n_s}{60} \right)$. ويمكن ، للحصول على نفس التأثير المغناطيسى ، الإستعاضة عن كل من هاتين التوافقيتين بمجموعة من الاقطاب التى طول خطوطها القطبية τ_p ، وعددها بناء على ذلك $2p$ يساوى عدد الاقطاب الرئيسية على العضو الدائر ، ويحمل كل قطب ملفات تذبذبية مكافئة . بذلك يكون التوزيع الفراغى للقوة الدافعة المغناطيسية على مدى الخطوة القطبية للملفات التذبذبية المكافئة على شكل منحنى جيبي اتساعه $\frac{\sqrt{2} u I}{\pi}$ أمبير لفة ،

وتدور إحدى هاتين المجموعتين ، التى سوف نطابق عليها اسم المجال الأمامى (forward field) بسرعة التزامن n_s فى نفس إتجاه دوران العضو الدائر ، وهو إتجاه الدوران الموجب ، بينما تدور المجموعة الثانية ، التى سوف نطلق عليها اسم المجال الخلفى (backward field) . بسرعة التزامن أيضا ، ولكن فى عكس إتجاه دوران العضو الدائر ، وهو إتجاه الدوران السالب .

٤ - يوجد توافقيات فراغية عالية كثيرة مختلفة الدرجات ، ونحصل عليها بالتعويض عن γ بأعداد صحيحة فردية من 3 إلى ما لانهاية فى المعادلة (٥-٣) ويوجد توافقتين فراغيتين لكل درجة ، إتساع إحدهما $\frac{\sqrt{2} u I}{\pi \gamma}$ أى $\frac{1}{\gamma}$ من إتساع التوافقية الفراغية الأساسية الأمامية ، وتدور بالسرعة $\frac{n_s}{\gamma}$ فى الإتجاه الموجب للدوران ، وإتساع الثانية $\frac{\sqrt{2} u I}{\pi \gamma}$ أى $\frac{1}{\gamma}$ من إتساع التوافقية الفراغية الأساسية الخلفية ، وهى تدور بالسرعة $\frac{n_s}{\gamma}$ فى الإتجاه السالب للدوران . هذا ويمكن ، للحصول على نفس التأثير المغناطيسى ، الإستعاضة عن كل من هاتين التوافقتين بمجموعة من الأقطاب المكافئة ، التى طول خطوطها القطبية $\frac{\tau_p}{\gamma}$ ، وعددها بناء على ذلك $2\gamma p$. بذلك يكون التوزيع الفراغى للقوة الدافعة المغناطيسية ، على مدى الخطوة القطبية ، للملفات التنبيه للمكافئة على كل قطب من هذه الأقطاب ، على شكل منحنى جيبي لإتساعه $\frac{\sqrt{2} u I}{\pi \gamma}$ أمبير لفة ، وتدور إحدى هاتين المجموعتين ، وهى المجموعة الأمامية ، بالسرعة $\frac{n_s}{\gamma}$ فى إتجاه الدوران الموجب ، بينما تدور المجموعة الثانية ، وهى المجموعة الخلفية ،

بالسرعة $\frac{n_s}{\gamma}$ أيضا في الإتجاه السالب الدوران .

٥ - تنتج التوافقيات الفراغية التي نوهنا عنها في 3 ، 4 قوى دافعة كهربية مضادة في ملفات المنتج، تتوقف قيمة كل منها على عدة عوامل ، منها قيمة الفيض المغناطيسى ، الذى ينشئه كل قطب من أقطاب المجموعة المكافئة المناظرة ، فى الشفرة الهوائية للآلة . ويلاحظ أن تردد هذه القوى الدافعة الكهربية جميعاً هو التردد الاساسى f_1 ، الذى يساوى تردد الينبوع f . فاذا اعتبرنا أن تردد القوة الدافعة الكهربية التى تنتجها التوافقية التى درجتها γ هو f_γ ، نجد أن :

$$f_\gamma = \gamma p \frac{n_s}{60\gamma} = \frac{p n_s}{60} = f_1 = f \dots (3-8)$$

وهذا شرط ضرورى لئى يمكن معادلة هذه القوى الدافعة الكهربية المضادة بضغط الينبوع .

للحصول على علاقات مناظرة للعلاقات السابقة ، عندما تكون الملفات فى الآلة ثلاثية المراحل وموزعة فى مجارى عددها q لكل مرحلة تحت كل قطب ، نعين أولا المنحنيات الفراغية الثلاثة ، للقوى الدافعة المغناطيسية γ_1 و γ_2 و γ_3 للراحل الثلاث ، وذلك باستخدام المعادلة (3-5) مع مراعاة أنه ، عند استخدام q مجرى لكل مرحلة تحت كل قطب بدلا من مجرى واحد ، يتعين علينا أن نستخدم عامل التصحيح k_w ، كما سبق شرحه ، فنضع $\frac{quik_w}{2}$ بدلا من $\frac{ui}{2}$ عند استنباط المعادلات المناظرة ، كما أنه بالنسبة للرحلة الثانية نستخدم $\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$ بدلا من ωt و $\left(\frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{2\pi}{3} \right)$ بدلا من $\frac{\pi x}{\tau_p}$ ، وبالنسبة

للمرحلة الثالثة تستخدم $\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$ بدلا من ωt و $\left(\frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{4\pi}{3} \right)$ بدلا من $\frac{\pi x}{\tau_p}$. وعلى هذا الاساس نحصل على معادلة منحنى التوزيع الفراغى لمحصلة القوى الدافعة المغناطيسية ، حول محيط المنتج ، لللفات ثلاثية المراحل ، عندما يمر فيها بحمزة مترنة من التيارات ثلاثية المراحل ، التى يحتوى المنحنى الزمنى لكل منها على توافقية أساسية فقط . ومع مراعاة أن $qu = \frac{T_{ph}}{p}$ نجد أن :

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 + y_3 = f(\psi_1) + f(\psi_2) + f(\psi_3) = f(\psi) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{T_{ph}}{p} I \sum_{\gamma=1,3,5,\dots} \frac{k_{w\gamma}}{\gamma} \left[\cos \left\{ \omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \cos \left\{ \omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right\} + \cos \left\{ \omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} + \frac{2}{3} \pi (\gamma - 1) \right\} \right. \\ &\quad \left. - \cos \left\{ \omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{2}{3} \pi (\gamma + 1) \right\} + \cos \left\{ \omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{4}{3} \pi (\gamma - 1) \right\} - \cos \left\{ \omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{4}{3} \pi (\gamma + 1) \right\} \right] \quad (3-9) \end{aligned}$$

نفرض أن $\alpha = \left(\omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right)$ ، $\beta = \left(\omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right)$ ،

ثم :

$$\begin{aligned} S_1 &= \cos \alpha + \cos \left[\alpha + \frac{2}{3} \pi (\gamma - 1) \right] \\ &\quad + \cos \left[\alpha + \frac{4}{3} \pi (\gamma - 1) \right] \end{aligned}$$

$$S_2 = \cos \beta + \cos \left[\beta - \frac{2}{3} \pi (\gamma + 1) \right]$$

$$+ \cos \left[\beta - \frac{4}{3} \pi (\gamma + 1) \right]$$

نجد أن قيم γ المختلفة تعطى S_1 و S_2 القيم الآتية :

$$\gamma = 1, 7, 13, \dots \rightarrow S_1 = 3 \cos \alpha, S_2 = 0$$

$$\gamma = 3, 9, 15, \dots \rightarrow S_1 = 0 \quad S_2 = 0$$

$$\gamma = 5, 11, 17, \dots \rightarrow S_1 = 0 \quad S_2 = 3 \cos \beta$$

وبالتعويض بهذه القيم في المعادلة (٩-٣) نحصل على صيغة عامة لها هي :

$$\gamma = f(\psi) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{T_{ph}}{p} I \sum_{\gamma=1 \dots 7, 5 \dots 13, 11 \dots}$$

$$\pm \frac{k_{w\gamma}}{\gamma} \cos \left(\omega t \pm \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \right) \dots \dots \dots (١٠-٣)$$

بتحليل المعادلة (١٠-٣) ، على نفس النمط الذي جرى مع المعادلة (٥-٣)

(٣) ، نستخلص نفس الحقائق التي استخلصناها من المعادلة (٥-٣) مع وجود الاختلافات الآتية :

١ - توجد توافقية فراغية أساسية واحدة فقط في هذه الحالة ، وهي

$$توافقية أمامية اتساعها \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{T_{ph}}{p} I k_w \text{ (حيث } \gamma = 1, S_2 = 0 \text{)}$$

وهي تدور بسرعة التزامن n_s في نفس اتجاه دوران العضو الدائر . وهذه هي

نفس النتيجة التي حصلنا عليها سابقا في المعادلتين (١-٣) ، (٢-٣) .

٢ - بالنسبة للتوافقيات الفراغية العالية ، لا توجد توافقيات من الدرجة

الثالثة أو أية درجة تكون مكرراً للعدد ثلاثة ($S_1=0, S_2=0, \gamma=3,9\dots$) على الإطلاق .

٣ - توجد توافقية واحدة فقط لكل درجة ، وتكون التوافقيات التي درجتها $(6m+1)$ ، حيث m عدد صحيح موجب ، توافقيات أمامية ، تدور بالسرعة $\frac{n_s}{6m+1}$ في اتجاه دوران العضو الدائر ، ويبلغ اتساعها $\frac{3\sqrt{2}}{\pi(6m+1)} \frac{T_{ph}}{p} I k_{w\gamma}$ ، بينما تكون التوافقيات التي درجتها $(6m-1)$ توافقيات خلفية ، تدور بالسرعة $\frac{n_s}{6m-1}$ في عكس اتجاه دوران العضو الدائر ، ويكون اتساعها $\frac{3\sqrt{2}}{\pi(6m-1)} \frac{T_{ph}}{p} I k_{w\gamma}$

في ختام هذه الدراسة ، الخاصة بالتوافقيات الفراغية في منحنى القوة الدافعة المغناطيسية ، وعلاقتها بالتوافقيات الزمنية في منحنى التيار ، نعيد التأكيد على ما يأتي بالنسبة للدولادات المتزامنة ثلاثية المراحل : بإهمال التوافقيات الزمنية العالية في منحنى التيار ، وإعتبار أنه يحتوى على توافقية زمنية أساسية فقط ، نحصل على توافقية أساسية وتوافقيات فراغية عالية في منحنى القوة الدافعة المغناطيسية المحصل للملفات المنتج . وبإهمال هذه التوافقيات الفراغية العالية أيضاً ، يمكننا أن نعتبر أن رد فعل المنتج يتمثل في مجموعة من الأقطاب المغناطيسية المكافئة ، التي عددها $2p$ ، وتدور بنفس سرعة التزامن n_s في اتجاه دوران العضو الدائر ، ويحمل كل قطب مكافئ منها عدداً مكافئاً من الأمبير لفات يساوى اتساع التوافقية الفراغية الأساسية ، أى $1.35 \frac{T_{ph}}{p} I k_w$. وينشأ المجال المغناطيسي المحصل ، أمام كل قطب في الشفرة الهوائية ، نتيجة للتأثير

المشترك عليها من الأقطاب الرئيسية والأقطاب المكافئة ، وهو الذى يتمثل فى عدد الخطوط المغناطيسية ϕ الذى نعوض به فى المعادلة (٢-٢) للحصول على القوة الدافعة الكهربائية المرحلية ، بفعل القوة الدافعة المغناطيسية المحصلة لمجموعة الأقطاب الرئيسية والمكافئة معاً . هذا ويطلق على المجال المغناطيسى الناشئ عن مجموعة الأقطاب المكافئة ، حول محيط المنتج ، اسم المجال المغناطيسى الدائر (Rotating field) .

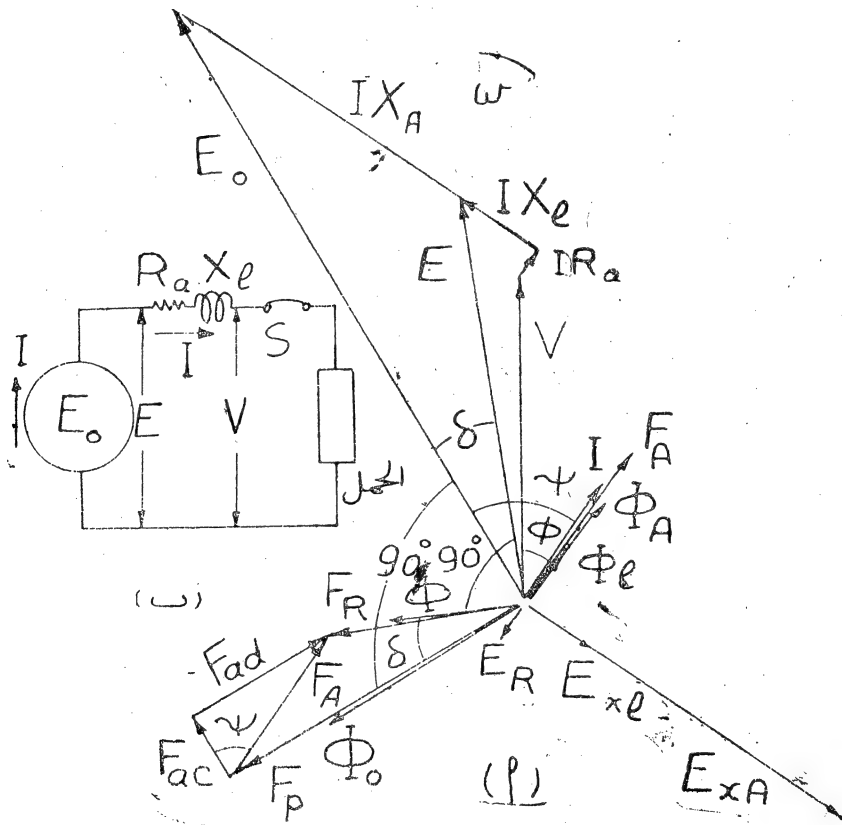
ثانياً - معامل تنظيم الضغط

(Voltage regulation)

معنى معامل التنظيم :

يتضح من كل ما سبق شرحه فى أولا أنه عند وجود حمل (load) على الآلة ، يتمثل فى تيارات مرحلية معينة (I أمبير لكل مرحلة عندما يكون الحمل متزاناً) ، تمر فى دوائر الحمل (التى يمكن اختزالها إلى دوائر تقليدية مكافئة عند اللزوم) ، وتمر أيضاً فى ملفات المنتج لإستكمال الدوائر الكهربائية المقفلة ، يكون رد فعل المنتج مكافئاً لمجموعة من الأقطاب المغناطيسية ، التى يحمل كل منها عدداً من الأمبير لفات المكافئة مقداره $AT_A = 1.35 \frac{T_{ph}}{p} I_{kw}$. فإذا كان تيار التنبيه فى ملفات الأقطاب الرئيسية يبالغ I_f أمبير فى هذه الحالة ، وعدد اللفات على كل قطب من هذه الأقطاب N_f ، تصبح القوة الدافعة المغناطيسية لكل قطب $AT_p = N_f I_f$ أمبير لفة . وبجمع AT_p مع AT_A جمعاً إيجابياً نحصل على القوة الدافعة المغناطيسية المحصلة AT_R ، التى تنشئ الفيض المغناطيسى المحصل ϕ فى الشفرة الهوائية ، الذى تحسب على أساسه قيمة القوة الدافعة الكهربائية

المرحلية E_{ph} بالمعادلة (٢-٢) . هذه القوة الدافعة الكهربائية E_{ph} (المتجه E) هي التي تعطي الضغط المرحلي على طرفي الحمل V ، وهبوط الضغط في كل من المقاومة المرحلية R_a ، وبماثة التسرب المرحلية (phase leakage reactance) X_l ، للمفات المنتجة ، عندما يمر فيها التيار المرحلي I . لذلك فإن E_{ph} تساوي المجموع الاتجاهي لهذه الضغوط جميعاً ، كما هو مبين في شكل (٦-٣) ، عندما تكون زاوية الاختلاف المرحلي بين I و V هي ϕ .



شكل (٦-٣)

عند رفع الحمل (فتح المفتاح S في شكل (٦-٣)) تصبح قيمة التيار الذي يمر في ملفات المنتج تساوى صفراً ، فيختفى تأثير رد فعل المنتج وتصبح قيمة AT_A تساوى صفراً . في هذه الحالة تفتش القوة الدافعة المغناطيسية للملفات الأقطاب الرئيسية ، التي تتمثل في الأعمير لفات AT_p على كل قطب ، فيضا مغناطيسياً مقداره ϕ خط لكل قطب ، بحيث يمكن على أساسه حساب قيمة القوة الدافعة الكهربائية E_o التي تعطيها الآلة ، عند رفع الحمل ، وتظهر على طرفيها (لعدم وجود تيار يسبب أى هبوط في الضغط داخل الآلة) ، وذلك باستخدام ϕ في المعادلة (٢-٢) بدلا من ϕ ، حيث :

$$E_o = 4.44 f T_{ph} \phi_o k_w \times 10^{-8} V \dots\dots (٣-١١)$$

هذا يعني أن رفع الحمل يؤدي إلى تغيير قيمة الضغط على طرفي الآلة من V إلى E_o ، كما أن وضع الحمل يؤدي إلى تغيير قيمة الضغط على طرفي الآلة من E_o إلى V . ويطلق على النسبة في تغيير الضغط على طرفي الآلة $\frac{E_o - V}{V}$ ، نتيجة لرفع الحمل أو وضعه ، اسم معامل تنظيم الضغط للآلة ، أو بالإختصار معامل التنظيم ، ويرمز له بالرمز ε ، ويكون معامل التنظيم المتوى عبارة عن حاصل ضرب ε في مائة .

$$\text{معامل التنظيم} = \varepsilon = \frac{E_o - V}{V} \dots\dots\dots (٣-١٢)$$

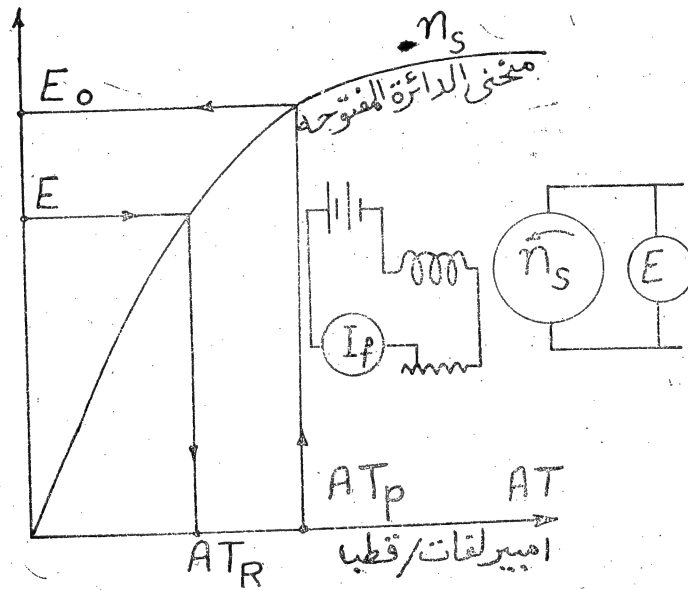
يعطينا معامل التنظيم فكرة واضحة عن مدى التغير الذي يحدث في قيمة الضغط على طرفي الآلة ، عند تغيير الحمل في حدود واسعة ، وعند رفعه أو وضعه . ونحن في حاجة إلى ذلك حتى نكون على بينة من أمر الأجهزة الموصلة على طرفي الآلة ، التي قد تتأثر تأثراً ضاراً نتيجة لهذا التغير . لذلك فإن معامل التنظيم قد يكون

من أم الملاح التي تقرر مبدأ قبول الآلة أو رفضها ، بالنسبة لاستخدامات معينة ، عند اختيار الآلة المناسبة .

وعندما نحتاج إلى حساب معامل التنظيم المولد المتزامن ، لا تتوفر لدينا عادة المعلومات التي يمكننا من أن نفعل ذلك بمتابعة الخطوات السابقة . ويتبع حساب معامل التنظيم ، في أغلب الحالات ، طرقاً محدودة ومعينة ، سوف نذكرها بالتفصيل فيما يلي . وتعتمد كل من هذه الطرق على معلومات تقليدية ، يعطيها المصنع الذي يصنع الآلة ، خصيصاً لذلك ، وتسمى بيانات التصميم (Design Data) . كما أنها قد تعتمد إلى جانب ذلك على بعض المعلومات ، التي يمكن أن نحصل عليها بعد إجراء تجارب معينة على الآلة ، كما سوف يتضح فيما بعد .

هذا ، وعلى العموم ، فإن حساب معامل التنظيم يتبع ، في جميع هذه الحالات عادة ، المنهج العام الآتي : يتحدد الضغط الطرفي الذي يلزم الحصول عليه على طرفي الآلة V ، والتيار I ، وزاوية الاختلاف المرحلي بينهما ϕ ، على حسب طبيعة الحمل المراد توصيله إلى الآلة . وبمعلومية R_a و X يمكننا ، برسم خطط المتجهات المبين في شكل (٦-٣ أ) ، الحصول على E_{ph} اللازم لإنتاجها بفعل الفيض المغناطيسي المحصل ϕ ، الذي تنشئه في الشفرة الهوائية للآلة محصلة AT_p و AT_A ، وهي AT_R . نستطيع تحديد قيمة AT_R من منحنى التفطس للآلة ، الذي يمكن أن نحصل عليه بإجراء تجربة اللاحمل على الآلة ، لكي يعطينا العلاقة بين القوة الدافعة الكهربائية المرحلية والتيار التنبيه I_f (أو الأامبير لغات على كل قطب $N_f I_f$ باعتبار N_f ذات قيمة ثابتة) ، عند سرعة التزامن n ، كما هو مبين في شكل (٧-٣) . نحسب AT_A من المعادلة (٢-٣) ، ثم نجمعها جمعاً اتجاهياً مع AT_R ، بعد أن نحدد الوضع المرحلي لكل منها بالنسبة للآخرى . بذلك نحصل على AT_p ،

التي يتحدد بناء على قيمتها مقدار E_o من منحنى التفطس للآلة ، بما يمكننا من استخدام المعادله (١٣ - ٣) لحساب معامل التنظيم . يبين شكل (٦ - ٣) طريقة تطبيق هذا المنهاج العام للحصول على قيمة E_o . وفيما يلي نشرح كيف يتم تحديد الوضع المرحلي النسبي بين كل من AT_R و AT_P ، والعوامل التي نأخذها في الاعتبار في هذه الأثناء ، وذلك قبل شرح الطرق المختلفة ، التي تتبع لتعيين معامل التنظيم ، وهي تعتمد جميعا على رسم مخطط المتجهات لهذه الكميات الموجهة الثلاث ، والضغوط التي تنتجها الفيوض الناشئة عنها في الشفرة الهوائية للآلة .



شكل (٦ - ٣)

مخطط متجهات الآلة المتزامنة :

Vector diagram of the synchronous machine

لكي نحدد الأوضاع النسبية للمتجهات الخاصة بكل من AT_R و AT_P و AT_A يجب رسم مخطط المتجهات الذي يجمع بين جميع المتجهات المعنية في هذا الشأن ، ونعني بها ، علاوة على هذه المتجهات ، متجهات الضغط الطرقي للآلة V ، و تيار الحمل I ، وهبوط الضغط في دائرة المنتج ، في كل من المقاومة ومانعة التسرب ، ثم متجهات القوى الدافعة الكهربائية ، التي تنتج في ملفات المنتج بتأثير الفيوض التي تنتجها القوى الدافعة المغناطيسية للأقطاب السابق ذكرها . وهذا هو مخطط متجهات الآلة المتزامنة . ويجب مراعاة الاعتبارات الآتية عند رسم هذا المخطط .

١ - أن هناك نوعين من زوايا الاختلاف المرحلي بين المتجهات في المخطط ، يجب ألا نخلط بينهما ، وهما زوايا الاختلاف المرحلي الزمني (time phase difference) وزوايا الاختلاف المرحلي الفراغي (space phase difference) . وبينما يفصل النوع الأول من الزوايا بين الضغوط والتيارات والفيوض المعنية ، فإن النوع الثاني يفصل عادة بين محاور القوى الدافعة المغناطيسية ، ممثلة في محاور الملفات والأقطاب المختلفة .

٢ - لا نستطيع أن نقرر أن الفيض المغناطيسي المحصل في الشجرة الهوائية ϕ ينفش بفعل القوة الدافعة المغناطيسية AT_R ، التي تنتج من جمع AT_P و AT_A ، جمعا لإتجاهها ، ما لم تكن هذه القوى الدافعة المغناطيسية الثلاث تنشئ فيوضها ، في الشجرة الهوائية ، بالتأثير على دوائر مغناطيسية ، تشتمل كاجزاء منها على هذه الشجرة ، وتكون متماثلة تماما . وإلا فانهنا يجب أن نحسب الفيض المغناطيسي الذي

تدشئة كل قوة دافعة مغناطيسية من القوتين AT_p و AT_a على حدة ، باعتبار المعاوقة التي تقابلها كل منهما في الدوائر المغناطيسية التي تؤثر عليها ، ثم نجمع الفيضين الناشئين للحصول على الفيض المغناطيسي المحصل Φ . وهنا يمكن السبب الرئيسى الذى يجعلنا فى الواقع نفرق بين طريقة رسم مخطط المنتجات فى كل من حالتى الآلات التوربينية ، والآلات ذات الأقطاب البارزة . فبينما نجد أنه فى حالة الآلات التوربينية يتيح لنا العضو الدائر الاسطوانى الشكل ، الذى يشبهه فى تكوينه السطحى العضو الثابت ، أن نعتبر أن الدوائر المغناطيسية ، التى تؤثر عليها القوى الدافعة المغناطيسية للمفات المنتج وملفات المجال ، متماثلة ، فأنها فى حالة الآلات ذات الأقطاب البارزة تؤثر على دوائر مغناطيسية مختلفة التكوين والمعاوقة ، وذلك نتيجة لوجود الفراغ بين الأقطاب ، مما يؤدي إلى زيادة طول الثغرة الهوائية ، وزيادة المعاوقة المغناطيسية ، بناء على ذلك ، زيادة كبيرة .

٣ — يجب ألا نخلط فى الاتجاه بين هبوط الضغط ، ومركبة القوة الدافعة الكهربائية اللازمة للموازنة أو التعادل مع هذا الهبوط ، وهما فى اتجاهين متضادين . وعلى سبيل المثال نجد أن V و IR_a و IX_1 ، فى مخطط المنتجات المبين فى شكل (٦-٣) ، هى مركبات القوة الدافعة الكهربائية (التى يمثلها الناتج E فى الرسم) اللازمة لموازنة هبوطات الضغط فى معاوقة الحمل z ، وكل من المقاومة وبما نسميه التسرب المرحلية للمفات المنتج . أما هبوطات الضغط نفسها E_{x1} ، E_R ، Iz فتكون فى الاتجاه المضاد ، وذلك لى يتحقق قانون كيرشوف عندما نضع

$$E + Iz + IR_a + IX_1 = 0$$

٤ — سبق أن ذكرنا أننا سوف نعتبر أن القوة الدافعة المغناطيسية للمنتج تتمثل فى اتساع التوافقية الفراغية الأساسية لمنحنى التوزيع الفراغى ، الذى حصلنا

عليه في شكل (٣-١) ، (٣-٢) ، ثم بالمعادلة (٣-١) ، وقيمتها AT_A أمبير
لقه لكل قطب ، وهى قيمة ثابتة بالنسبة للزمن ، ولكن المتجه الذى يمثلها ، وسوف
نرمز له بالرمز F_A ، ينطبق دائما على محور الملفات التى يكون التيار فيها فى قيمة
النهاية العظمى له . لذلك نجد أن المتجه F_A يدور فى الإتجاه الموجب للدوران
بسرعة الزمان n ، ويمكن بناء على ذلك اعطاؤه نفس الوضع المرحلى فى مخطط
المتجهات ، الذى يأخذه التيار I ، بحيث ينطبق دائما عليه .

٥ — يكون المتجه الذى يمثل الفيض المغناطيسى المحصل Φ ، على حسب
قانونى فراداي وانز للتأثير الكهرومغناطيسى $(e = -N \frac{d\Phi}{dt})$ ، متقدما
على متجه القوة الدافعة الكهربائية المرحلية ، الذى نرمز له بالرمز E ، بزاوية
اختلاف مرحلى زمنى مقدارها 90 درجة كهربية . وتكون القوة الدافعة
المغناطيسية المحصلة المتمثلة فى القيمة AT_R ، ثابتة بالنسبة للزمن ، ولكن
المتجه الذى يمثلها ، ونرمز له بالرمز F_R ، يدور فى الإتجاه الموجب للدوران
بسرعة الزمان n . لذلك يمكن إعطاء المتجه F_R نفس الوضع الذى يأخذه المتجه
 Φ فى مخطط المتجهات بحيث ينطبق دائما عليه . وبناء على ذلك نجد أن زاوية
الاختلاف المرحلى الفراغى بين F_A و F_R فى مخطط المتجهات هى نفس زاوية
الاختلاف المرحلى الزمنى بين I و Φ ، أى $(\psi + 90)$ ، كما يظهر فى مخطط
المتجهات فى شكل (٣-٦) ، وذلك باعتبار أن ψ هى زاوية الاختلاف المرحلى
الزمنى بين كل من I و E .

بناء على هذه الأسس جميعها نستطيع الآن بيان كيفية رسم مخطط المتجهات ،
لكل من الآلة التوربينية ، والآلة ذات الانطاب البارزة .

١ - مخطط متجهات الآلة التوربينية :

تمتلك الآلة التوربينية عضواً دائراً اسطوانياً (Cylindrical rotor) ،
يحتوى على مجارى ، توضع فيها ملفات التنبيه ، التى تكون مجالا مغناطيسيا ذا
قطبين فقط ، كما سبق شرحه بالإشارة إلى شكل (٥ - ٢) . وفى هذه الحالة يمكننا
أن نعتبر أن معاوقة الدائرة المغناطيسية ، التى تؤثر عليها كل من الامبير لفات
 AT_p و AT_A و AT_R ، واحدة بالنسبة لآى وضع من أوضاع العضو الدائر ،
وذلك نظراً لتماثل هذه الأوضاع جميعها ، نتيجة للتكوين الاسطوانى للعضو
الدائر . نستطيع على هذا الأساس أن نتعامل مع المتجهات F_p و F_A و F_R
بالجمع أو بالطرح اتجاها ، على حسب أوضاعها فى مخطط المتجهات ، عندما نريد
جمع أو طرح الفيوض الناشئة عنها للحصول ، على واحد منها فى النهاية .

يمثل شكل (٦ - ٣ أ) بأكمله ، فى الواقع ، مخطط المتجهات للآلة التوربينية ،
ونضيف فيما يلى بعض الايضاحات الخاصة بالمتجهات التى لم يرد ذكرها فيما سبق ،
مع موجزاً أتى ذكره ، وذلك حتى تكتمل الصورة بالنسبة لمخطط متجهات هذا النوع
من الآلات المتزامنة بالذات :

١ - يتحدد الضغط الطرفى للآلة V ، و تيار الحمل I ، وزاوية الاختلاف
المرحلى بينها ϕ ، على حسب نوع الحمل ومتطلباته . E_R هى عبارة عن هبوط الضغط
فى المقاومة المرحلية للملفات المنتجة R_a ، نتيجة مرور التيار المرحلى I فيها ، وتكون
لذلك فى عكس اتجاه I . أما IR_a فهى مركبة الضغط فى القوة الدافعة الكهربائية
للآلة لموازنة E_R ، وهى لذلك فى عكس اتجاهها . ϕ_i عبارة عن الفيض المتسرب
(leakage flux) حول الملفات (بعضه متسرب فى الأسنان ، وهو يعبر الثغرة
الهوائية ، ولكنه لا يصل إلى الأقطاب الرئيسية ، وبعضه متسرب حول الأجزاء

الطرفية للملفات). وهذا الفيض المتسرب يسبب هبوطا في الضغط E_{xl} في الملفات، يمكن حسابه على أساس قيمة معينة لمعامل الحث الذاتي التي تعطى بالممانعة X_l (يكون حساب معامل الحث الذاتي على نمط الطريقة التي اتبعت في حالة آلات التيار المستمر، كتاب هندسة الآلات الكهربائية ص ٥٧٦ — ٥٨٠). تكون ϕ في اتفاق مرحلي مع I (تعمل زاوية التخلف المغناطيسي بينهما بسبب وجود ثغرة هوائية كبيرة نسبيا في الدائرة المغناطيسية)، E_{xl} متخلفة عنها مرحليا بزاوية مقدارها 90 درجة. IX_l هي مركبة الضغط في القوة الدافعة الكهربائية للآلة، اللازمة لموازنة E_{xl} ، وهي لذلك في عكس اتجاهها. بجمع المتجهات V و IR_a و IX_l نحصل على المتجه E .

٢ — ϕ هي قيمة الفيض المغناطيسي المحصل في الثغرة الهوائية الذي ينتج E ، فيها متعامدان، ويكون F_R متجه القوة الدافعة المغناطيسية المحصلة AT_R في اتجاه ϕ ، بينما يكون F_A متجه القوة الدافعة المغناطيسية AT_A في اتجاه I ، بحيث يحصران بينهما الزاوية $\phi + 90$ ، ونحصل منهما على F_p ، متجه القوة الدافعة المغناطيسية AT_p ، الذي يكون في اتجاه ϕ ، الفيض المغناطيسي الكلي في الثغرة الهوائية عند رفع الحمل. E_o هي القوة الدافعة الكهربائية التي ينتجها الفيض ϕ . ويربط E بـ ϕ و E_o بمعادلة القوة الدافعة الكهربائية (٢-٢).

٣ — نحصل على قيمة AT_R من منحنى الدائرة المفتوحة (open circuit characteristic)، وهو نفس منحنى التغطس أو اللا حمل المبين في شكل (٣-٧)، وذلك بمعرفة قيمة E . كما نحصل على قيمة E_o ، المناظرة لقيمة AT_p ، التي نحصل عليها من مخطط المتجهات (المماثلة بالمتجه F_p)، من نفس هذا المنحنى أيضا، كما هو موضح على الشكل هذا ونظرا لصغر قيمة كل من IR_a و IX_l

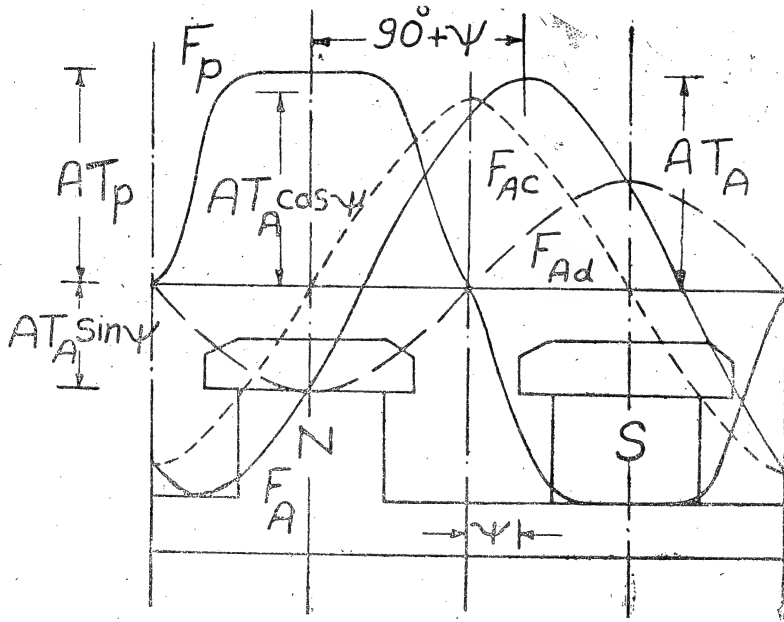
يحسن بنا حساب قيمة E وعدم الإعتماد في الحصول عليها أو على ψ من الرسم ، ونجد في هذه الحالة أن :

$$E = \sqrt{(V \cos \phi + IR_a)^2 + (V \sin \phi + IX_l)^2} \dots (٣-١٢)$$

$$\psi' = \tan^{-1} \frac{V \sin \phi + IX_l}{V \cos \phi + IR_a} \cong \phi \dots (٣-١٤)$$

(الزاوية بين E, I)

٤ — يكون منحنى الدائرة المفتوحة معطى عادة مع بيانات التصميم الآلة ، فان لم يتيسر الحصول عليه عن هذا الطريق يمكننا لإجراء تجربة الا حل للحصول على هذا المنحنى . وفي هذه الحالة توصل الآلة كما هو مبين في شكل (٣-٧) وتدار بدون



شكل (٣ - ٨)

حمل عند سرعة التزامن ، التي تحفظ ثابتة ، وتؤخذ قراءات الضغط المرحلى مع تيار التثبيته I_f (الذى يضرب في N_f للحصول على قيم $I_f N_f$ المناظرة) . وإذا لم

يمكن حفظ السرعة عند القيمة n_s بحرى تصحيح قراءات الضغط بالضرب في نسبة n_s إلى السرعة الفعلية .

٥ — يعمل رد فعل المنتج على خفض قيمة الضغط المرحلى المتولد في ملفات المنتج من القيمة E_0 إلى القيمة E نتيجة لخفض قيمة الفيض المغناطيسى في الثغرة الهوائية من القيمة ϕ_0 إلى القيمة ϕ . ويكون هبوط الضغط الممثل بالمتجه E_{xA} في هذه الحالة ناشئاً عن الفيض المغناطيسى ϕ_A ، الذى تنشئه القوة الدافعة المغناطيسية AT_A ، الممثلة بالمتجه F_A ، في الثغرة الهوائية للآلة ، وهو يعطى عند جمعه لإتجاهها مع ϕ_0 الفيض المغناطيسى ϕ . نظراً لأن ϕ_A يكون في توافق مرحلى مع ϕ_1 ، مما يجعل E_{xA} في توافق مرحلى مع E_{x1} ، فإن مركبة الضغط IX_A ، في القوة الدافعة الكهربائية للآلة ، التى تعادل E_{xA} تصبح في إتجاه IX_1 ، ويمكن اعتبارها ذات طبيعة مماثلة لها . وهذا يعنى أننا نستطيع اعتبار تأثير رد فعل المنتج ، على القوة الدافعة الكهربائية للآلة E_0 ، معادلاً لفعل ممانعة حثية ، قيمتها X_A تساوى $\frac{E_{xA}}{I}$ ، ويطلق عليها اسم ممانعة رد الفعل (reaction reactance) . ويمكن في هذه الحالة جمع X_1 و X_A في ممانعة واحدة ، تستخدم للحصول على E_0 من V مباشرة ، وتسمى ممانعة التزامن (synchronous reactance) ويرمز لها بالرمز X_s . وبإضافة B_s إلى هذه الممانعة نحصل على معاوقة التزامن (synchronous impedance) ، ويرمز لها بالرمز Z_s ، حيث $Z_s = R_a + jX_s$ ، وسوف نعود إلى الحديث عن هذه الممانعة ، بشئ أكثر من التفصيل ، فيما بعد .

٦ — الزاوية δ هى مقدار الإزاحة التى تحدث لمحور الفيض الاصلى ϕ_0 . الذى ينطبق مع محور القطب الرئيسى على العضو الدائر ، نتيجة لرد فعل المنتج . وهذا النوع من التأثير لرد فعل المنتج يطلق عليه التأثير المغناطيسى المتعامد لرد

فعل المنتج (Cross magnetising effect of armature reaction)
وهو ينتج من مركبة التيار التي تكون في اتفاق مرحلي مع الضغط E_o ، ويشبه في طبيعته رد فعل المنتج في آلات التيار المستمر المسمى بهذا الاسم . وتكون δ في هذه الحالة عبارة عن الزاوية بالدرجات الكهربائية التي يتخلف بها محاور المجال المغناطيسي المحصل ϕ عن محاور المجال المغناطيسي الأصلي ، للقطب الرئيسي ϕ_o ، الذي ينطبق على محاور هذا القطب . أما بالنسبة لمركبة التيار المتعامدة مع E_o ، فهي تعطى تأثيراً مغناطيسياً مباشراً على الأقطاب الرئيسية . لذلك يطلق على هذا النوع من التأثير رد فعل المنتج اسم التأثير المغناطيسي المباشر لرد فعل المنتج (Direct magnetising effect of armature reaction) ويكون التأثير المباشر بالإضافة أو الطرح ، ويتوقف هذا على نوع الآلة هل هي محرك أو مولد ، كما يتوقف على نوع مركبة التيار هل هي سعوية أو حثية (inductive or capacitive) .
يبين شكل (٨-٣) كيف تنتج التأثيرات المغناطيسية المختلفة لرد فعل المنتج بناءً على تحليله إلى مركبتين ، متعامدة ومباشرة .

وكما أننا اعتبرنا أن رد فعل المنتج ، الذي يتمثل في تأثير الفيض المغناطيسي الناشئ عن ملفات المنتج على الفيض المغناطيسي للأقطاب ، يمكن أن يمثل بالممانعة X_a ، التي تحدد مع X_1 ممانعة التزامن X_s للآلة ، فإنه يمكن اعتبار ممانعة تأخذ في الحساب رد فعل المنتج المباشر المكافئ ، ويطلق عليها اسم ممانعة التزامن للمحور المباشر (Direct axis synchronous reactance) ، ويرمز لها بالرمز X_{sd} ، ثم ممانعة ثنائية ، تأخذ في الحساب تأثير رد فعل المنتج المتعامد ويطلق عليها اسم ممانعة التزامن للمحور المتعامد (quadrature axis synchronous reactance) ، بحيث يكون تأثير الممانعتين معاً مساوياً لتأثير ممانعة

التزامن X_2 .

٧ - يمكن بناء على ما سبق ذكره في تحليل المنتج F_A إلى مركبتين F_{Ac} و F_{Ad} . تكون قيمة F_{Ac} عبارة عن $AT_A \cos \psi$ وقيمة F_{Ad} عبارة عن $AT_A \sin \psi$. وهذا يعنى تحليل التوافقية الفراغية الأساسية لرد فعل المنتج إلى مركبتين (لكل منهما توزيع فراغى على شكل منحني جيبي أيضا) ، ينطبق محور احدهما وهى الممثلة بالمنتج F_{Ad} على محور القطب ، وتعطى للتأثير المغناطيسى المباشر، ويبعد محور الثانية زاوية مقدارها 90 درجة عن هذا المحور ، وتعطى التأثير المغناطيسى المتعامد . ونظرا لأن كل هذه القوى الدافعة المغناطيسية تقابل نفس المعاوقة المغناطيسية عند تأثيرها على الدوائر المغناطيسية المختلفة فى الآلة التوربينية، فاننا لا نحتاج إلى تحليل F_A إلى F_{Ac} و F_{Ad} فى حالة الآلات التوربينية . ونكتفى باستخدام المتجهات F_R و F_A و F_P ، كما سبق ذكره .

ب - تحليل متجهات الآلة ذات الاقطاب البارزة ونظرية بلوندل لرد الفعل المزدوج (Blondel two reaction theory) :

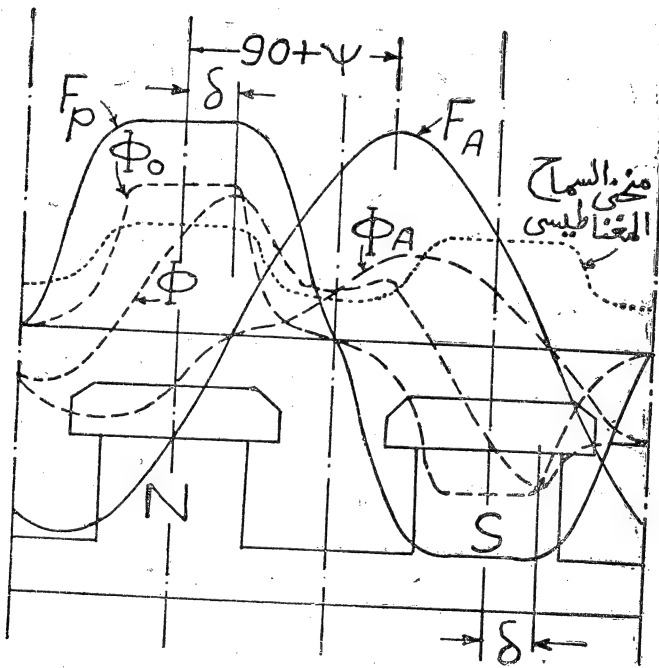
أمكن فى حالة الآلة التوربينية التغاضى عن التقريب الناقص عن استخدام التوافقتين الفراغيتين الأساسيتين لمنحنى القوة الدافعة المغناطيسية ملفات الاقطاب الرئيسية وملفات المنتج للحصول على القوة الدافعة المغناطيسية ATR ، بمعلومية كل من AT_p و AT_A ، ثم استخدامها لتحديد ϕ أو تحديد القوة الدافعة الكهربائية المرحلية E مباشرة . وذلك نتيجة التآثر فى التكوين بين العضو الدائر والعضو الثابت أولا ، ثم ثبوت قيمة المعاوقة المغناطيسية بالتقريب حول أى مسار من المسارات التى تدفع فيها هذه القوى الدافعة المغناطيسية فيوضها .

نجد فى الآلات ذات الاقطاب البارزة أن تكوين العضو الدائر يختلف

اختلافا تاما عن تكوين العضو الثابت ، فبينما يوجد في الاول ، على مدى محيطه ، أجزاء حديدية غير منتظمة الاستدارة (هي سطوح الاقطاب التي تعطى شكلا معيناً لتعدد أبعاد مطلوبة للثغرة الهوائية) ، ثم تجاريف كبيرة (هي الفراغات بين الاقطاب التي تمتلئ بملفات التنبية) ، يكون الشان سطحا اسطوانيا منتظما تتخلله المجارى . وفي هذه الحالة لا نستطيع أن نوجد العلاقات بين القوى الدافعة المغناطيسية المختلفة على اعتبار أنها تناسب جميعاً ، بمعامل مشترك ، مع الفيوض الناشئة عنها ، وإنما يجب أن نتعامل مع هذه الفيوض مباشرة . كما أننا لا نستطيع أيضاً ، من باب التقريب المقبول ، كما فعلنا في الحالة السابقة ، أن نهمل التوافقيات الفراغية العالية ، في كل من المنحنى الفراغى لملفات الاقطاب الرئيسية ، والمنحنى الفراغى لملفات المنتج ، ونكتفى بالتعامل مع التوافقتين الفراغيتين لهذين المنحنيين .

إذا راجعنا ما تم عمله بالنسبة للالات التوربينية ، نجد أن المطلوب النهائي ، لكل ما أجرى من حسابات ، هو تحديد قيمة معامل التنظيم ، على أساس ضغط معين V مطلوب على طرفى الآلة ، عند تيار الحمل I ، الذى يختلف عن الضغط مرحلياً بالزاوية ϕ . وقد بينا العلاقات ، التى تربط بين الكميات المختلفة في مخطط المتجهات ، لى نجد الطريقة التى نستطيع أن نحدد بها AT_p ، وهى قيمة الأمبير لفات التى يلزم وجودها على كل قطب من الاقطاب الرئيسية عند الحمل الكامل ذى المواصفات المعطاه ، لى تعادل الأمبير لفات AT_A الناشئة من رد فعل تيار هذا الحمل ، ثم تبقى الأمبير لفات المحصلة AT_R ، لى تعطى المجال المغناطيسى المحصل ϕ في الثغرة الهوائية ، الذى ينتج القوة الدافعة الكهربائية E ، فنحصل على ضغط طرفى V . ونحن في حاجة إل مثل هذا المنهاج ، لتحديد معامل التنظيم في حالة

الآلات ذات الاقطاب البارزة ، نسترشد فيه بمخطط متجهات، مرسوم بمعلومية كل من AT_A و AT_R ، للحصول على AT_p معينة ، وذلك دون التعرض لتحديد قيم الفيوض المختلفة ، التي تعتمد على القيم المختلفة للدعاوقة المغناطيسية المعقدة لمسارات هذه الفيوض ، عندما تؤثر القوى الدافعة المغناطيسية عند نقط مختلفة على المنتج أو على الاقطاب المغناطيسية . ولكي ندرك مدى نصيب الحيل ، الذي أوجده بلوندل لهذه المسألة ، من الصحة ، على هدى الإعتبارات السابقة ، يجب أن نستعرض أولا التفاصيل الكاملة لموضوع رد فعل المنتج في الآلات ذات الاقطاب البارزة على النحو التالي :



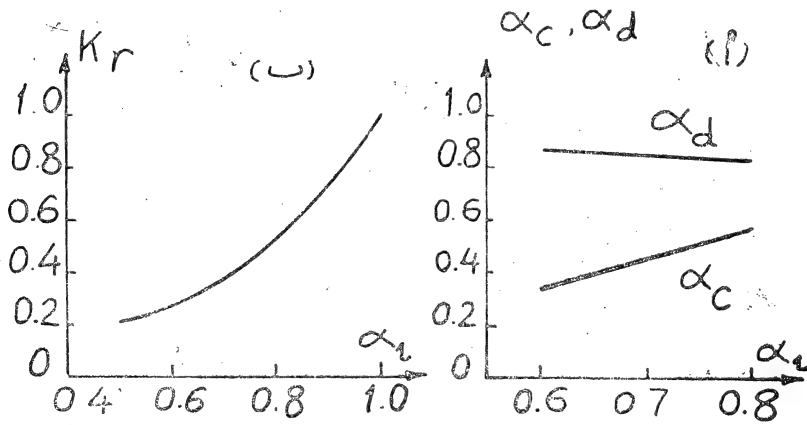
شكل (١-٣)

ينشأ الفيض المغناطيسى ، الذى يؤثر به رد فعل المنتج على الفيض المغناطيسى للأقطاب الرئيسية ، بفعل القوة الدافعة المغناطيسية للمفات المنتج ، التى يمكن الحصول على القيم المختلفة لها ، عند النقاط المختلفة حول محيط المنتج ، باستخدام المعادلة (١٠-٣) ، أو المنحنى الذى تمثله ، المبين فى شكل (٩-٣) ، مع السماح المغناطيسى (magnetic permeance) (عكس المعاوقة المغناطيسية) ، للثغرة الهوائية عند هذه النقاط ، محسوبا من ناحية المنتج ، والذى نفترض أننا حصلنا على منحنى توزيعه كما هو مبين فى شكل (٩-٣) (سوف نبين كيفية الحصول على هذا المنحنى فى باب تصميم الآلات المتزامنة) . وبضرب الاحداثيين الرئيسيين ، فى المنحنيين السابقين عند النقاط المختلفة ، نحصل على منحنى توزيع الفيض المغناطيسى Φ_A ، لرد فعل المنتج على مدى الخطوة القطبية ، كما هو مبين فى شكل (٩-٣) . بذلك يصبح مطلوبا منا الآن إيجاد قيمة الامبير لفات AT_p ، للالزام وضعها على كل قطب من الأقطاب الرئيسية ، لى تعطى الفيض المغناطيسى Φ_o ، المبين توزيعه على مدى الخطوة القطبية فى شكل (٩-٣) ، والذى نحصل عليه باستخدام منحنى توزيع القوة الدافعة المغناطيسية للمفات الأقطاب الرئيسية ، عند النقاط المختلفة على مدى الخطوة القطبية ، مع السماح المغناطيسى للثغرة الهوائية عند هذه النقاط ، محسوبا من ناحية القطب ، والذى نفترض أننا حصلنا على منحنى توزيعه كما هو مبين فى نفس الشكل . هذا ويجب أن تقع محصلة Φ_o و Φ_A ، عند النقاط المختلفة على مدى الخطوة القطبية ، على منحنى توزيع الفيض المغناطيسى المحصل Φ ، الذى يعطى القوة الدافعة الكهربائية E ، ثم الضغط الطرفى V ، عندما يمر تيار الحمل المعلوم I فى ملفات المنتج . وهذه العملية يكاد يكون تنفيذه مستحيلا على هذا النحو لعدة اعتبارات ، أهمها أن الحصول على منحنى توزيع Φ_o يستلزم معرفة AT_p ، التى نريد تحديدها على أساس معين للفيض المغناطيسى

المحصل ϕ . ثم إن معرفة الفيض المغناطيسى المحصل ϕ ، على أساس قيمة معينة للقوة الدافعة الكهربائية E ، لا يساعد في شيء ، مادام منحني توزيع هذا الفيض على مدى الخطوة القطبية غير معلوم ، نظراً لجهلنا بالمنحني الفراغى لتوزيع القوة الدافعة المغناطيسية F_R على مدى هذه الخطوة .

وقد أمكن بلوندل إيجاد طريقة تقريبية ، تعطى نتائج قريبة جداً من النتائج التى تعطيها التجارب العملية على الآلة الواقعية ، بحيث يمكن التعويل عليها ، واعتبارها صحيحة بدرجة مقبولة من التقريب . وقد أطلق بلوندل على طريقته هذه اسم طريقة رد الفعل المزدوج ، وفرق فيها بين المحورين الأساسيين فى الآلة ، اللذين يختلف توزيع السطح المغناطيسى للشفرة الهوائية حول كل منهما اختلافاً يئنا ، بسبب وجود الفجوات بين الأقطاب ، مما يؤدي إلى اختلاف قيمة الفيض المغناطيسى ، الذى تنشئه قوة دافعة مغناطيسية معينة ، عندما ينطبق محور المنتج الذى يمثلها مع كل محور من هذين المحورين ، وهما المحور المباشر والمحور المتعامد . ونستطيع على أساس نظرية بلوندل ، وما أدخل عليها من تعديلات ، أن نعود إلى استخدام الكميات AT_R و AT_A كما استخدمناها فى الحالة السابقة ، مع استخدام ثوابت معينة ، وتعديل فى أوضاع المنتجات ، بحيث تأخذ فى الاعتبار جميع العوامل المؤثرة السابقة . ويكون ذلك على أساس أن التأثير الناشئ عن رد فعل المنتج ذو نوعين مختلفين ، وهما التأثير المباشر والتأثير المتعامد ، بحيث ينشأ التأثير من النوع المباشر عندما يقع محور القوة الدافعة المغناطيسية ، التى مقدارها AT_A ويمثلها المنتج F_A ، على محور القطب الرئيسى ، وينشأ التأثير من النوع المتعامد عندما يقع محور نفس هذه القوة الدافعة المغناطيسية على محور التعادل بين قطبين رئيسيين . ومن ثم نفترض أنه يوجد على نفس محور AT_A أمبير لفات بالمقدار $AT_d = \alpha_d AT_A$ ، بحيث تعطى تأثيراً على المحور المباشر يتحدد

بالقيمة $\psi \sin AT_d$ ، وأمبير لفات بالمقدار $AT_c = \alpha_c AT_A$ ، مع الأولى في نفس الوقت ، وتعطى تأثيراً على المحور المتعامد تتحدد قيمته بالمقدار $AT_c \cos \psi$ بحيث تؤخذ الإعتبارات السابقة شرحها ، بالنسبة للعلاقات المختلفة بين القوى الدافعة المغناطيسية المؤثرة ، والسماح المغناطيسي الذي يقابلها في المواضع المختلفة ، عند تقدير كل من α_c و α_d ، اللذين اتضح أنهما يتوقفان على قيمة النسبة بين طول قوس سطح القطب b ، والخطوة القطبية τ_p ، التي يرمز اليها بالرمز α_i ($\alpha_i = \frac{b}{\tau_p}$) (سوف نعود إلى تفصيل ذلك في باب تصميم الآلات المتزامنة ، وتجد في شكل (١٠-٣) المنحنيات التي تعطى α_c و α_d كدالة لـ α_i) . هذا ونظراً لأن التأثير المتعامد لرد فعل المنتج في المحور المتعامد يتوقف على

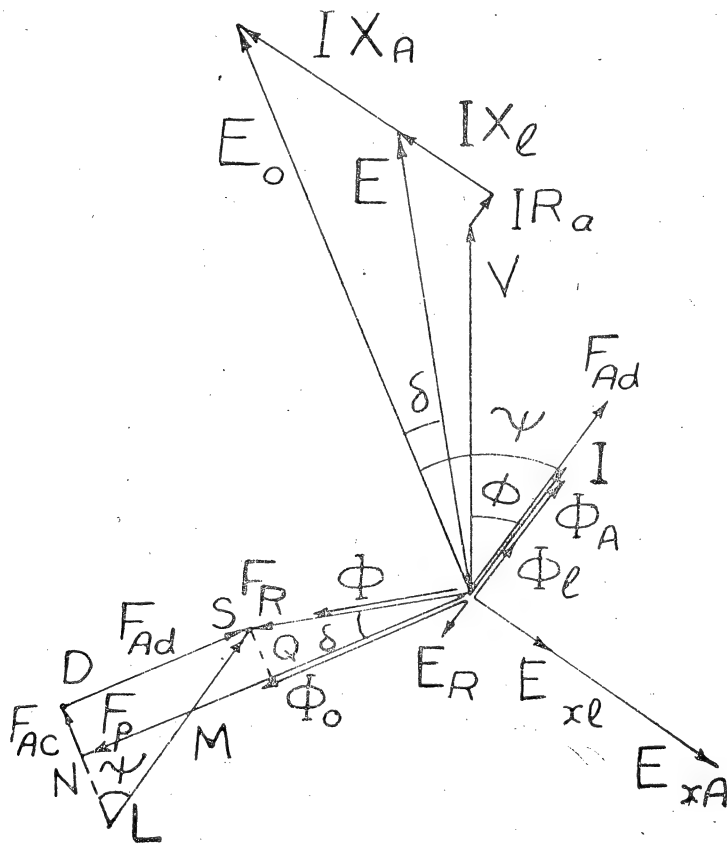


شكل (١٠-٣)

$\psi \cos AT_A$ ، والتأثير المباشر في المحور المباشر يتوقف على $\psi \sin AT_A$ ، فأننا نعتبر أن طول المتجه الذي تنشأ بسببه زاوية الإزاحة δ عبارة عن $AT_c \cos \psi$ ، وأن طول المتجه الذي يعطى قيمة الأمبير لفات AT_p ، اللازم وجودها عند الحل الكامل ، يتحدد بالقيمة $\psi \sin AT_d$.

يتضح من هذا كله أننا نستطيع رسم مخطط المتجهات للآلة ذات الانطاب
البارزة ، بطريقة تشبه تلك التي اتبعناها في حالة الآلة التوربينية ، المبينة في شكل
(٣-٦) ، على النحو التالي :

١ - نرسم الموجات I , V , E , ... الخ ، حتى نحصل على المتجه F_R ،
بنفس الطريقة التي اتبعناها في شكل (٣-٦) ، وذلك كما هو مبين في شكل
(٣-١١)



شكل (٣-١١)

٢ — بدلا من المتجه F_A نرسم الآن ، وفي نفس اتجاه I ، المتجهان F_c و F_d ، حيث يمثل الاول الامبير لفات AT_c ، ويمثل الثانى الامبير لفات AT_d .
نصل النقطة M (طرف F_c) بالنقطة O (نقطة الاصل) ونمد OM حتى يقابل العمود الساقط عليه من L (طرف F_d) في N ، فيكون ON هو المتجه المطلوب ، وهو يمثل الامبير لفات AT_p اللازم وضعها على كل قطب من الاقطاب الرئيسية ، لكي نحصل على الضغط الطرفى v عند الحمل الكامل . وفيما يلي العلاقات التى تبرهن على ذلك :

$$NQ = DS = SL \sin \psi = AT_d \sin \psi = \alpha_d AT_A \sin \psi$$

$$= F_{Ad}$$

$$SQ = SM \cos \psi = AT_c \cos \psi = \alpha_c AT_A \cos \psi = F_{Ac}$$

إذا لم يقيس الحصول على α_d و α_c من المنحنيين المبينين فى شكل (١٠-٣) ، يمكن حسابهما من المعادلتين الآتيتين :

$$\alpha_c = \frac{\alpha_i \pi - \sin \alpha_i \pi + \frac{2}{3} \cos \frac{\alpha_i \pi}{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{4}{\pi} \sin \alpha_i \frac{\pi}{2}}$$

$$\alpha_d = \frac{\alpha_i \pi + \sin \alpha_i \pi}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{4}{\pi} \sin \alpha_i \frac{\pi}{2}} \dots \dots (٣-١٥)$$

٣ — يمكن فى بعض الحالات تقريب α_d إلى الواحد الصحيح (وهى تساوى 85 ، 0 فى المتوسط تقريبا) ، بحيث تصبح $AT_d = AT_A$ ، وفى هذه الحالة تستخدم النسبة K_p ، وهى النسبة بين السماح المغناطيسى لكل من مسارى الفيض

المغناطيسى في المحور المتعامد والمحور المباشر ، لرسم خطوط المتجهـات ، الذى لا يختلف عن سابقه فى شىء سوى أننا نأخذ SL ممثلا للأُـمبير لفات AT_A ، بدلا من AT_a و SM ممثلا للأُـمبير لفات AT_A بدلا من AT_c . وبين شكل (١٠-٣ب) القيم المختلفة للمعامل K_F كدالة للنسبة α أيضا . ويعنى رسم خطوط المتجهات على هذا النحو الأخير ، أننا اعتبرنا أن الفرق ، بين حالى الآلة التوربينية والآلة ذات الأقطاب البارزة ، يكمن فى هذه الحالة فى وجود الفجوات الهوائية الكبيرة بين الأقطاب البارزة ، مما يؤدى إلى خفض قيمة السماح المغناطيسى لمسار الفيض فى المحاور المتعامدة ، عن قيمته فى المحاور المباشرة (التى يتخذ خارج قسمة واحد على طول الثغرة الهوائية عند محور القطب مقياسا لها) ، بالنسبة K_F . فيقل الفيض المغناطيسى ، الذى تنشئه مركبة القوة الدافعة المغناطيسية لرد فعل المنتج فى المحور المتعامد ، بنفس النسبة . وهذا يدعونا إلى إعتبار لإزاحة محور ϕ_0 ، الممثلة فى الزاوية δ ، ناشئة عن $K_F F_{Ac}$ ، الذى يساوى SQ فى هذه الحالة ، بدلا من F_{Ac} فى شكل (٦-٣) .

المعاوقة المتزامنة (Synchronous impedance) :

سبق أن ذكرنا أن الفيض المغناطيسى ϕ_A الناشئ عن ملفات المنتج ، وهو الذى يتمثل فى وجوده رد فعل المنتج ، يقوم بدور مشابه لذلك الذى يقوم به الفيض المغناطيسى المتصرب ϕ_1 ، من حيث أنه ينتج قوة دافعة كهربية مضادة ، رمزنا إليها بالرمز E_{xA} فى شكل (٦-٣) و (١١-٣) . ونظرا لأن كل من ϕ_A و ϕ_1 فى اتفاق مرحلى مع التيار (وذلك باهمال زاوية التخلّف المغناطيسى الناشئة عن وجود مفقودات حديدية فى مسار الفيض الناشئ عن التيار ، لأن هذا المسار يكون أساسا فى الهواء) ، فإن E_{xA} و E_{xl} تكونان فى اتفاق مرحلى معاً ،

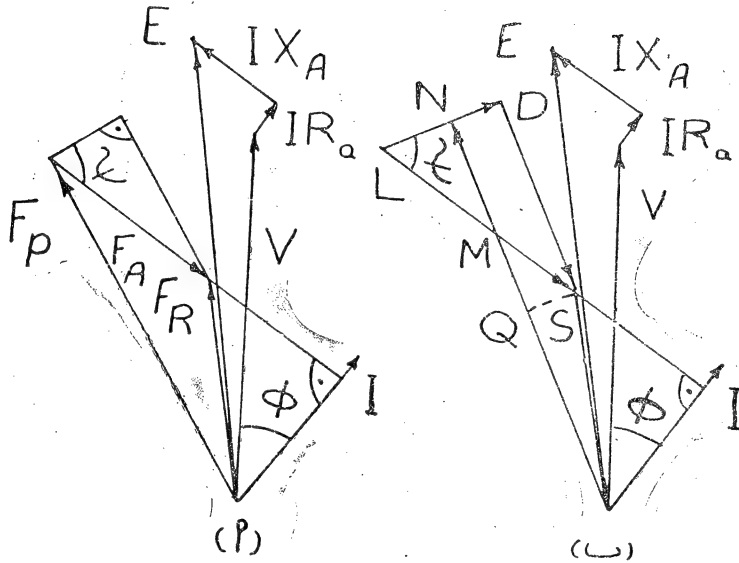
ومختلفتين بزاوية 90 درجة كهربية عن I . وهذا يدهونا إلى اعتبار E_{xA} ، كما سبق أن اعتبرنا E_{x1} ، ناشئة عن مرور التيار I في مانعة مرحلية مكافئة X_A يطلق عليها اسم مانعة رد الفعل ، كما سبقت الإشارة اليه . وبجمع هذه الممانعة ، مع مانعة التسرب المرحلي X_1 ، نحصل على ما اتفق على تسميته بممانعة التزامن المرحلية (phase synchronous reactance) للآلة X_s . وتعطى هذه الممانعة الأخيرة مع مقاومة المنتج المرحلية R_a المعاوقة المتزامنة المرحلية للآلة Z_s بحيث تصبح :

$$Z_s = R_a + j(X_A + X_1) = R_a + jX_s$$

ويمكن تحديد E_o ، ثم معامل التنظيم للآلة ، بمعرفة V و I وزاوية الاختلاف المرحلي بينهما ϕ ، دون الحاجة إلى التعرض لكل من AT_p و AT_A ، إذا توفرت لدينا قيمة Z_s بشقيها R_a و X_s ، كما يتضح من شكل (٦-٣) و (١١-٣) .

نستطيع قياس معاوقة التزامن للآلة بإجراء اختبارى الدائرة المفتوحة ودائرة القصر عليها . وفي الواقع أننا نحصل من نتائج هذين الاختبارين على منحنى لمعاوقة التزامن كدالة لتيار التنبيه ، أو الأمبير لفات على كل قطب من الأقطاب الرئيسية . وقد سبق شرح طريقة إجراء تجربة الدائرة المفتوحة على المولد ، للحصول على منحنى الخطأ المبين في شكل (٧-٣) . ويكون لإجراء اختبار دائرة القصر على المولد بطريقة مشابهة ، إذ يدار بسرعة التزامن n_s ، التى يجب الاحتفاظ بها في هذه الحالة ثابتة طوال مدة إجراء التجربة ، وقصر أطراف المولد مع إدخال أمبير متر في أحد الخطوط (أو ثلاثة أمبير مترات في الخطوط الثلاثة وأخذ متوسط القراءات) ، لقياس قيمة تيار القصر I_{sc} ، عند القيم المختلفة لتيار التنبيه I_f (التى يمكن حساب قيمة $I_f N_f$ المناظرة منها) ، ثم

يرسم منحنى خواص القصر (Short circuit characteristic) للآلة ، مع
منحنى الدائرة المفتوحة على نفس الشكل ، كما هو مبين في شكل (١٦ - ٣) .



شكل (١٦ - ٣)

ويلاحظ أن إجراء اختبار دائرة القصر يكون عند تيارات تنبيه صغيرة القيمة ،
وذلك حتى لا تمر في الآلة تيارات قصر كبيرة ، قد تتسبب الحرارة الناشئة عنها في
تلف الملفات ، ولا يجب أن تزيد قيمة أكبر تيار قصر يمر في الآلة في خلال هذه
التجربة ، عن $I_{\frac{1}{2}}$ من قيمة تيار الحمل الكامل للآلة ، كما يراعى أخذ القراءات ، بعد
أن تزيد قيمة التيار عن الحمل الكامل ، بسرعة كبيرة ، بحيث لا يستمر مرور هذه
التيارات في الآلة أكثر من دقائق معدودة .

عندما يكون تيار التنبيه في الآلة I_f ، فإنها تعطى قوة دافعة كهربية مرحلية
مقدارها E_0 ، كما هو مبين في شكل (١٦ - ٣) . فإذا قصرت أطراف الآلة
والأمور باقية على ما هي عليه ، يمر في الآلة تيار قصر مرحلي قيمته I_{sc} ، وهو

ينظر تيار التنبيه I_f على منحنى دائرة القصر المبين على نفس الشكل . ونظراً لأن قيمة الضغط الطرفي V ، على أطراف المراحل المقصورة ، يساوى صفراً ، فإن القوة الدافعة الكهربائية E_o تتمتع بأكملها فى هبوط الضغط الناشئ عن مرور التيار I_{sc} فى المعاوقة المتزامنة Z_s . وهذا يعنى أن $E_o = I_{sc} Z_s$ ، أو

$$Z_s = \frac{E_o}{I_{sc}} \dots\dots\dots (٣-١٦)$$

بذلك يمكننا الحصول على القيم المختلفة للمعاوقة المتزامنة، عند تيارات التنبيه المختلفة ، ورسم المنحنى الخاص بها المبين فى شكل (٣-١٦) .

يتضح من دراسة منحنى المعاوقة المتزامنة أنها تظل ثابتة القيمة فى المنطقة الخطية (Straight line region) لمنحنى الدائرة المفتوحة ، ثم تقل بصورة ملحوظة عند حدوث التشبع المغناطيسى فى الآلة . ولكننا مع ذلك نعتبرها ثابتة فى كثير من الأحيان (وهذا يعنى اهمال ظاهرة التشبع المغناطيسى فى الآلة) ، لأن هذا يساعدنا كثيراً فى تحليل بعض الموضوعات الخاصة بتشغيل الآلات المتزامنة تحليلًا رياضياً ، يبين لنا تفاصيلها ، ويعطينا نتائج بدرجة مقبولة من التقريب بالنسبة للواقع العملى . وتكون قيمة Z_s فى الآلات التوربينية أكبر نسبياً منها فى الآلات ذات الاقطاب البارزة ، كما يتضح من عقد المقارنة بين شكل (٣-٦) و (٣-١١) . وقد يبلغ هبوط الضغط النسبى فى الآلات التوربينية $\left(100 \frac{IZ_s}{V} \right)$ حوالى 175 % فى الأنواع الحديثة منها . وهذا يساعد على حماية المولدات من تيارات القصر ، التى قد تنشأ فى مجموعات القوى (power systems) التى تغذيها مثل هذه المولدات ، بسبب حدوث خطأ (fault) فى المجموعة . لذلك يندر حماية هذه المولدات بتمهات زيادة الحمل

(overload relays)

طرق تعيين معامل التنظيم :

يعتبر معامل التنظيم من المواصفات الهامة للآلة ، التي تحتاج كثيرا إلى تحديددها ، وخصوصا فيما يتعلق بتنظيم ضغطها (Voltage control) ، أو حمايتها (Protection) ، أو تشغيلها على التوازي (parallel running) مع آلات أخرى . وتختلف طرق تعيين معامل التنظيم على حسب المعلومات المتوفرة لدينا عن الآلة ، التي قد تكون عبارة عن بيانات التصميم الواردة من المصنع ، أو نتائج اختبارات جرت عليها في المصنع ، أو قنا بأجرائها بأنفسنا في المعمل . ونستطيع في بعض الأحيان ، إذا توافرت الظروف المناسبة ، تحميل الآلة بالمواصفات المطلوبة ، وقياس الضغط مع الحمل ، وبدون الحمل ، حتى يمكن حساب معامل التنظيم من القراءات الفعلية .

وفيما يلي عرض للطرق المختلفة التي تدفع لتعيين معامل التنظيم ، باستخدام بيانات التصميم ، أو نتائج الاختبارات ، أو كليهما معا .

١ - طريقة الأمبير لفات البسيطة (simple ampere — turn method)
نعمد في هذه الطريقة على المعلومات التي نستطيع أن نرسم بها الجزء من مخطط المنتجات، الخاص بالحصول على AT_p بمعلومية AT_A و AT_R ، كما ورد في شكل (٦-٣) . ونحتاج في هذه الحالة إلى منحنى الدائرة المفتوحة عند سرعة التزامن n_s ، الذي نحصل عليه مع بيانات التصميم ، أو بأجراء تجربة الدائرة المفتوحة على الآلة ، وهو يعطينا قيمة AT_R المناظرة للضغط V في هذه الحالة . كما نحتاج إلى قيمة AT_A ، التي نحصل على قيمة تقريبية لها من منحنى خواص القصر للآلة ، وذلك باعتبارها مساوية للأمبير لفات AT_{ff} اللازمة لإعطاء تيار قصر يساوي

تيار الحمل الكامل I ، كما هو مبين في شكل (١٦-٣). برسم F_A و F_R وبينهما زاوية $(90 + \phi)$ نحصل على F_p ، وقد سبق أن شرحنا كيف يتم الحصول على قيمة E_p ، ثم معامل التنظيم ϵ ، باستخدام هذه المعلومات، عند شرح طريقة رسم مخطط المتجهات الذي جاء في شكل (٦-٣). وتطلى هذه الطريقة في الواقع أرقاما لمعامل التنظيم تقل عن القيمة الحقيقية في الآلات العادية.

٢ — طريقة رد فعل المنتج (Armature reaction method):

نحتاج في هذه الحالة إلى المعلومات اللازمة لرسم مخطط المتجهات الخاص بالأمبير لفات كما ورد في شكل (٦-٣)، بالنسبة للآلات التوربينية، وكما ورد في شكل (١١-٣)، بالنسبة للآلات ذات الانطاب البارزة. وتعتبر هذه الطريقة في الواقع تطبيق مباشر لرسم كل من هذين المخططين.

ويمكن استخدام المعادلة (١-٣) أو (٢-٣) لحساب قيمة AT_A ، لو توفرت بيانات التصميم اللازمة، كما يمكن استخدام منحنى خواص القصر للحصول على AT_A على النحو التالي: نحدد هبوط الضغط IZ في المعاورة المكونة من مقاومة المنتج المرحلية R_p وممانعة التسرب المرحلية X_p ، ونوجد الأمبير لفات AT_z اللازمة لإعطاء الضغط المعادل لها على منحنى الدائرة المفتوحة، فتكون قيمة AT_A هي الفرق بين AT_z و AT_{fl} ، كما هو مبين في شكل (١٣-١٣).

عند إيجاد معامل التنظيم بهذه الطريقة تعدل أوضاع المتجهات أحيانا، بحيث تكون F_R في اتجاه E و F_A عمودية على اتجاه I ، كما هو مبين في شكل (١٣-٢ أ، ب) بالنسبة لنوعى المولدات.

٣ - طريقة المعاوقة المتزامنة (Synchronous impedance method)

نحتاج في هذه الحالة إلى منحني الدائرة المفتوحة ومنحني خواص القصر
 لحساب قيمة Z_s كما سبق شرحه . كما نحتاج إلى قيمة R_a المقاومة المرحلية الفعالة
 للمفاتيح المنتجة ، وقد نحصل عليها مع بيانات التصميم أو بالتجربة . تحسب قيمة
 بمساعدة الزمان المرحلية من العلاقة $X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2}$ ، ثم تحسب قيمة
 E بالرجوع إلى شكل (٦-٣) ، (١١-٣) على النحو التالي :

$$E_o = \sqrt{(V \cos \phi + IR_a)^2 + (V \sin \phi + IX_s)^2}$$

ومن ثم يمكن حساب معامل التنظيم . هذا ونظرا لأن قيمة Z_s ليست ثابتة ، فان قيمة معامل التنظيم تختلف على حسب Z_s التي نستخدمها ، والتي تكون عادة عند تيار التنبيه المناظر للامبير لفات AT_{fl} . وتعطى هذه الطريقة أرقاما بمعامل التنظيم أكبر من حقيقةتها بكثير في الواقع .

٤ - طريقة منحني التشبع بمعامل قدره صفر :

(Zero - Power - Factor saturation curve method)

نحتاج في هذه الحالة إلى منحني الدائرة المفتوحة ، ومنحني التشبع عند الحمل الكامل بمعامل قدره يساوى الصفر ، الذي نحصل عليه بأخذ قراءات الضغط المرحلي على أطراف الآلة وتيار التنبيه (الذي نحسب منه $N_f I_f$ الامبير لفات على كل قطب) عند إدارة الآلة بسرعة التزامن n_s ، وتحميلها بالتيار الثابت القيمة I عند معامل قدرة متأخر يساوى الصفر (يكون ذلك بتوصيل بممانعة حثية ثلاثية المراحل على أطراف الآلة تأخذ تياراً مرحلياً مقداره I أمبير . ويضبط التيار على قيمة الحمل الكامل الثابتة I بتغيير قيمة الممانعة كلما تغيرت قيمة تيار التنبيه) .

يبين شكل (١٣ - ٣) منحني الدائرة المفتوحة ، ومنحني التشبع عند الحمل الكامل بمعامل قدرة متأخر صفر . إذا فرضنا أنه عندما تكون قيمة الامبير لفات على كل قطب من أقطاب الآلة AT_p ، تكون قيمة القوة الدافعة الكهربائية E_o على المنحني الأول ، و E_1 على المنحني الثاني ، فلا بد أن قيمة الضغط الطرفي V ، مع نفس تيار الحمل I عند معامل قدرة متأخر ، يقع بين الصفر والواحد الصحيح ، تقع بين E_o و E_1 . لكي نحصل على قيمة V ، عند معامل قدرة معين

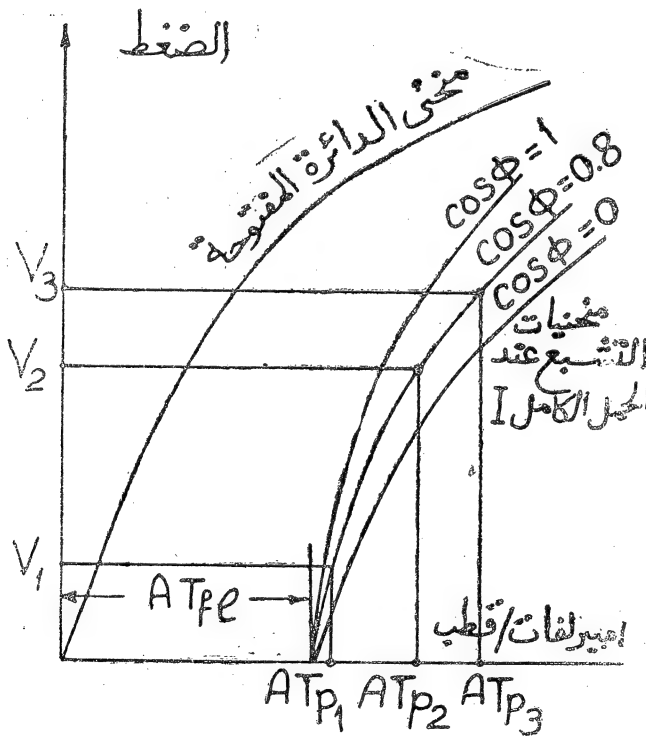
$\cos \phi$ ، نعتبر هبوط الضغط IZ_s في معاوقة التزامن Z_s ثابت القيمة ويساوى $E_0 - E_1$ ، ويختلف وضعه المرحلي على حسب زاوية الاختلاف المرحلي ϕ بين تيار الحمل الكامل بقيمته الثابتة I والضغط الطرفي V . وهذا يعني أننا نعتبر E_0 ، I ، Z_s (وبالتالي IZ_s) ذات قيم ثابتة ومعروفة ، وأن V تتغير على حسب تغير ϕ .
 يبين شكل (١٣ - ١٣ب) كيف نحصل على قيمة V باتباع الخطوات الآتية : نرسم مركبة الضغط IR_s ، التي تعادل هبوط الضغط في المقاومة المرحلية للمفات المنتجة ، بحيث تصنع الزاوية ϕ مع الاتجاه الرأسى ويمثلها المتجه LM . نقيم عموداً من M على LM ، ونحدد عليه النقطة N ، بحيث يمثل المتجه LN مركبة الضغط IZ_s اللازمة لمعادلة هبوط الضغط في معاوقة التزامن المرحلية للآلة . نرسم من N المتجه ON ، الذى يقع طرفه O على المستقيم الرأسى LO ، ويمثل طوله الضغط E_0 . فيكون المتجه OL ممثلاً للضغط الطرفي V ، الذى تتحدد قيمته بناء على ذلك .
 ومن ثم يمكننا حساب قيمة معامل التنظيم $\varepsilon = \frac{E_0 - V}{V}$.

وبلاحظ أننا فى الواقع استخدمنا فى هذه الطريقة المعاوقة المتزامنة ، وهبوط الضغط الناشئ عنها مرة أخرى ، ولكن تمتاز الطريقة ، فى هذه المرة عن المرة السابقة ، فى أن هبوط الضغط IZ_s يقاوم فى ظروف هذا الحمل الكامل فعلاً ، مما يجعلنا نحصل على نتائج أقرب ما تكون إلى الواقع العملى . لذلك فإننا نعمد فى بعض الأحيان ، عند توافر المعلومات اللازمة ، إلى رسم منحني التشبع عند الحمل الكامل بمعامل قدرة صفر أولاً ، بطريقة بواتيه ، ثم نحسب معامل التنظيم بالمعلومات المستخرجة منه ، كما سبق شرحه أعلاه .

طريقة بوانيه لرسم منحنى التشبع عند حمل معين بمعامل قدره صفر :

(The Potier method of determining load characteristics at zero power factor) :

يمكننا بمعرفة البيانات الكاملة للتصميم حساب قيم Z_s, R_s, X_s, X_A, AT_A وكذلك رسم منحنى الدائرة المفتوحة للآلة . وفي هذه الحالة نستطيع رسم منحنيات الحمل (load characteristics) المختلفة ، بمعاملات قدرة مختلفة ، بالاستفادة من الطرق المختلفة لحساب معامل التنظيم على النحو التالي : نفرض أننا نريد رسم منحنى التشبع عند حمل معين I بمعامل قدرة معين $\cos \phi$ (متقدم



شكل (١٤ - ٣)

أو متأخر). نفرض قيميا مختلفة للضغط V_1, V_2, V_3, \dots ونحدد عند كل قيمة منها ، باحدى الطرق السابقة ، وباستخدام بيانات التصميم المتوفرة لدينا ، قيمة الأمبير لفات المناظرة على كل قطب $AT_{p1}, AT_{p2}, AT_{p3}$. ويتحدد المنحنى المطلوب على نفس محاور منحنى الدائرة المفتوحة بالأحداثيات $(V_1, AT_{p1}), (V_2, AT_{p2}), (V_3, AT_{p3}) \dots$ إلخ ، كما هو مبين في شكل (١٤-٣) . وبنفس الطريقة يمكننا أن نحصل على منحنى التشبع عند الحمل I' بمعامل قدرة $\cos \phi'$ بالأحداثيات $(V_1, AT'_{p1}), (V_2, AT'_{p2}), (V_3, AT'_{p3}) \dots$ إلخ ويلاحظ أن هذه المنحنيات جميعا تشترك في نقطة واحدة هي نقطة القصر ، التي تكون قيمة الضغط الطرقي المرحل فيها يساوى صفرا ، ويكون معامل القدرة المتأخر عندها يساوى الصفر تقريبا أيضا ، بسبب وجود ممانعة التزامن الحثية ذات القيمة الكبيرة بالنسبة لمقاومة ملفات المنتج $\left(\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_a} \cong \frac{\pi}{2} \right)$. ونحن نهتم من بين كل هذه المنحنيات اهتماما خاصا بمنحنى التشبع عند الحمل الكامل بمعامل قدرة صفر ، حيث يمكن إجراء التجربة الخاصة به وأخذ قراءاتها بسهولة في المعمل ، كما أنه يمكننا رسم هذا المنحنى بمعرفة قراءة واحدة عليه (الضغط الطرقي مع الأمبير لفات المناظرة على كل قطب ، ويمكن حسابها أيضا من بيانات التصميم كما هو مبين أعلاه) إلى جانب قراءة تجربة دائرة القصر عند نفس تيار الحمل I ، وذلك على النحو المبين في شكل (١٣-٣) ، كما يأتي : النقطة S مأخوذة من تجربة دائرة القصر ، بمعنى أن OS يساوى AT_n ، وهي الأمبير لفات اللازم وجودها على كل قطب من الأقطاب الرئيسية للآلة لكي يمر فيها تيار الحمل الكامل المرحلي عند قصر أطرافها . ويكون الجزء SB مساويا AT_a ، وهي أمبير لفات رد فعل المنتج ، والجزء OB مساويا

AT_z ، وهي الأمبير لفات اللازمة لإنتاج مركبة الضغط IZ التي تعادل هبوط الضغط في كل من المقاومة المرحلية ، وعماقة التسرب المرحلية . ويمكن تحديد S أولا ، ثم كل من B ، H من بيانات التصميم مباشرة ، ولكننا نحتاج في حالتنا هذه إلى نقطة أخرى على منحنى التشبع عند الحمل الكامل بمعامل قدره صفر ، وهي النقطة C ، لتحديد كل من B ، H . يظل رد فعل المنتج ، وكذلك هبوط الضغط IZ ، كما هو تقريبا عند النقطة C ، نظراً لعدم تغير قيمة التيار أو معامل القدرة . لذلك نرسم CDQ أفقياً من C بحيث يكون $OS = CQ = AT_A + AT_z$. نرسم من Q المنحنى (أو الخط المستقيم في الواقع) الذي يوازي الجزء الأول من منحنى الدائرة المفتوحة ابتداء من O (الذي نستطيع أن نعتبره خطاً مستقيماً) فتحدد النقطة P على هذا المنحنى . نسقط العمود PD على CQ لتحديد النقطة D ، حيث يكون QD مساوياً AT_z ويكون CD مساوياً AT_A . بذلك يمكن تحديد كل من B ، H حيث $OB = QD = AT_z$ ، وحيث $BS = DC = AT_A$. بذلك يكون $PD = IX_1$ ، $HB = IZ$ ، ويكون المثلث CQP مساوياً ومشابهاً تقريبا للمثلث SOH . ويمكن برسم مثلثات مائلة للمثلث PQC ، وتقع رؤوسها على منحنى الدائرة المفتوحة ، لتحديد نقاط أخرى مثل C ، تقع على أطراف قواعدها ، وعلى منحنى التشبع المطلوب في نفس الوقت . وهذه هي طريقة بواتيه في رسم منحنى التشبع عند حمل معين بمعامل قدرة صفر ، ثم استخدام المعلومات التي نحصل عليها في حساب معامل التنظيم كما سبق شرحه .

ملاحظة : أن تكوين المثلث $PQDC$ يتم في الواقع على الأساس الآتي :

يُضَع من شكل (١٣ - ٣) أننا نستطيع أن نعتبر أن الفرق العددي بين E و V

هو IX_1 تقريباً . فإذا كانت النقطة P على منحنى الدائرة المفتوحة تمثل الضغط E ، فإن الخط DC يكون في مستوى الضغط V ، إذا كان طول PD يساوى IX_1 . فإذا كان DC يمثل الأمبير لفات AT_A ، اللازمة لمعادلة تأثير رد فعل المنتج عند تيار الحمل المعلوم ، فإن النقطة C تقع على منحنى التشبع المطلوب . ونظراً لأن طول IX_1 يساوى تقريباً طول IZ في المعتاد ، فإن التفرقة بينها لا معنى لها مع التقريبات الكثيرة المشار إليها .

أما بالنسبة لتكوين المثلث OHS فن الواضح أن $IZ = E$ في هذه الحالة (دائرة القصر) لأن V يساوى صفراً ، فيكون الفرق العددي بين V ، E هو IZ الذى يمثله HB ، كما هو مبين في شكل (١٣ - أ) . لذلك فإننا نستطيع رسم مثلث بوابتيه بمعلومية $PD = IX_1$ أو $HB = IZ$ ، على حسب المعلومات الموجودة .

أمثلة محلولة على الباب الثالث

1 — a 3 — phase stator has 4 slots per pole per phase and there are 4 conductors in series per slot. Plot to scale the distribution of magnetomotive force in the airgap (a) when the current in phase I is maximum; (b) $\frac{\pi}{6}$ later than (a) ; (c) $\frac{\pi}{2}$ later than (a) . The maximum current per phase is 10 A, and the variation with time is sinusoidal. Full pitch coils are being used.

يبين شكل (١ - ٣) حل الجزء (a) ، غاية ما في الأمر أننا نحتاج إلى إيجاد قيمة F_m ، حتى يمكن تحديد مقياس الرسم ، وذلك على النحو التالى :

$$q = 4 , u = 4 , \sqrt{2} I = 10 , \alpha = \frac{180}{12} = 15^\circ$$

$$k_w = k_d = \frac{\sin 30}{4 \sin 7.5} = 0.959$$

$$F_m = 4 \times 4 \times \frac{10}{2} \times 0.959 = 76.6 \text{ أمبير لفة/قطب}$$

بالنسبة لحل الجزء (b) يعدل وضع المتجه F_1 (وتبعاً لذلك F_2 , F_3) ، بحيث يصنع الزاوية $\frac{\pi}{6}$ متقدماً في اتجاه الدوران ، ويعاد رسم منحني القوة الدافعة المغناطيسية لللفات المنتجة بنفس الطريقة السابقة : ويكرر ذلك مرة أخرى ، مع تقديم F_1 (ومعه F_2 , F_3) الزاوية $\frac{\pi}{2}$ في اتجاه الدوران ، للحصول على حل الجزء (c) .

2 — A 1500 KVA, 3 phase, star connected, 50 c/s synchronous generator runs at 375 r.p.m. and has a terminal voltage of 3300 V at full load. The open circuit characteristic of the machine at normal speed is as follows :

Induced E.M.F, volts/phase	1500	1900	2100	2300	2500
Field current, amps	56	81	106	158	300

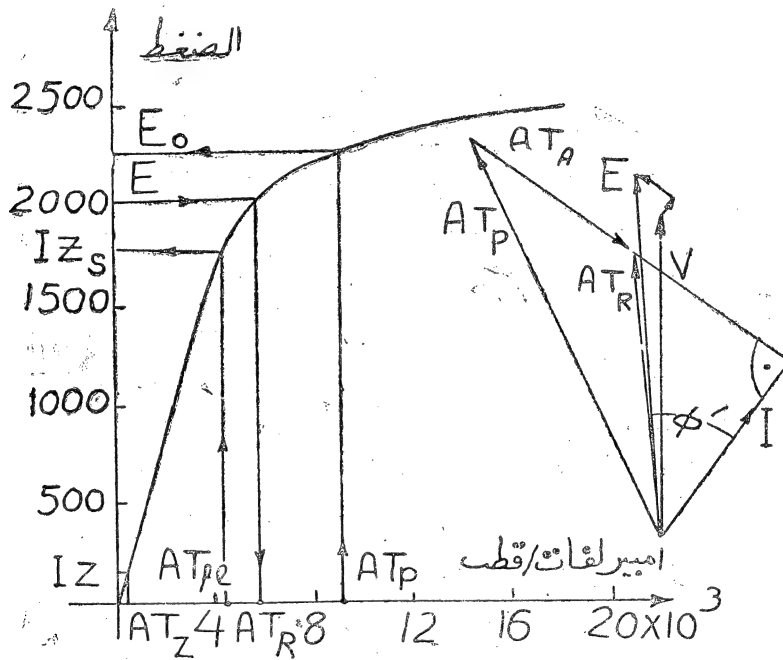
The field winding has 60 turns per pole. The armature has a leakage reactance drop of 8 % and a resistive drop of 1 %. The stator has 144 slots each containing 4 conductors. Find the regulation for full load 0.8 power factor lagging.

نحصل أولاً على منحنى الدائرة المفتوحة بدلالة الأمبير لفات على كل قطب

$N_f I$ بدلا من تيار النخبة I_f كما هو مبين ، وذلك بضرب تيارات النخبة في
 $: 60 = N_f$

E_{ph} :	1500	1900	2100	2300	2500
$N_f I_f$:	3360	4860	6360	9480	18000

نرسم منحنى الدائرة المفتوحة ، كما هو مبين في شكل (١٥-٣) .



شكل (١٥-٣)

$$V = \frac{3300}{\sqrt{3}} = 1.05 \text{ V} , \quad p = \frac{60 \times 50}{375} = 8 ,$$

$$2p = 16$$

$$q = \frac{144}{16 \times 3} = 3 , \quad \alpha = \frac{360 \times 8}{144} = 20^\circ$$

$$k_w = k_d = \frac{\sin 30}{3 \sin 10} = 0.96$$

$$\frac{I R_a}{V} \times 100 = 1, \quad I R_a = 19.05 \text{ V}$$

$$\frac{I X_l}{V} \times 100 = 8, \quad I X_l = 152.4 \text{ V}$$

$$T_{ph} = \frac{4 \times 144}{2 \times 3} = 96$$

$$I = \frac{1500 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3300} = 262 \text{ A}$$

$$AT_A = 1.35 \times \frac{96}{8} \times 262 \times 0.96 = 4050 \text{ أمبير/لفه/قطب}$$

باستخدام طريقة رد فعل المنتج نحصل على AT_R (المنظرة للضغط E)
من منحنى الدائرة المفتوحة ، ثم نحصل على AT_p من خطوط المتجهات ، كما هو
مبين في شكل (١٥-٣) ، وأخيرا نحصل على E_o من منحنى الدائرة المفتوحة ،
كما هو مبين في شكل (١٥-٣) بالأسهم .

$$E = \sqrt{((V \cos \phi + I R_a)^2 + (V \sin \phi + I X_l)^2}$$

$$= \sqrt{(1525 + 19.06)^2 + (1143 + 152.4)^2} = 2017 \text{ V}$$

$$\phi' (E, I) = \tan^{-1} \frac{1295.4}{1544.05} \approx 40^\circ$$

$$AT_R = 5700 \quad \text{أمبير/لفه/قطب}$$

$$AT_p = 9000 \quad \text{أمبير/لفه/قطب}$$

$$E_o = 2275 \text{ V}$$

$$\varepsilon = \frac{2275 - 1905}{1905} = 0.194 = 19.4 \%$$

يمكننا حل هذه المسألة باستخدام طريقة المعاوقة المتزامنة على النحو التالي :

$$IZ = \sqrt{(IR_a)^2 + (IX_l)^2} = \sqrt{(19.05)^2 + (152.4)^2} = 164V$$

$$AT_z = 320 , AT_{fl} = AT_A + AT_z = 4370$$

بإيجاد الضغط المناظر لـ AT_{fl} من منحنى الدائرة المفتوحة كما هو مبين في شكل (١٥-٣) نحصل على مركبة الضغط IZ_s ، اللازم لمعادلة هبوط الضغط في معاوقة التزامن ، ومن ثم نحصل على Z_s وكذلك IX_s ، كما يأتي .

$$IZ_s = 1780 V , Z_s = \frac{1780}{262} = 6.8 \Omega$$

$$IX_s = \sqrt{(IZ_s)^2 - (IR_a)^2} = \sqrt{(1780)^2 - (19.05)^2} \approx 1780$$

$$E_o = \sqrt{(V \cos \phi + IR_a)^2 + (V \sin \phi + IX_s)^2}$$

$$= \sqrt{(1525 + 19.06)^2 + (1143 + 1780)^2} \approx 3300 V$$

$$\varepsilon = \frac{3300 - 1905}{1905} = 0.75 = 75 \%$$

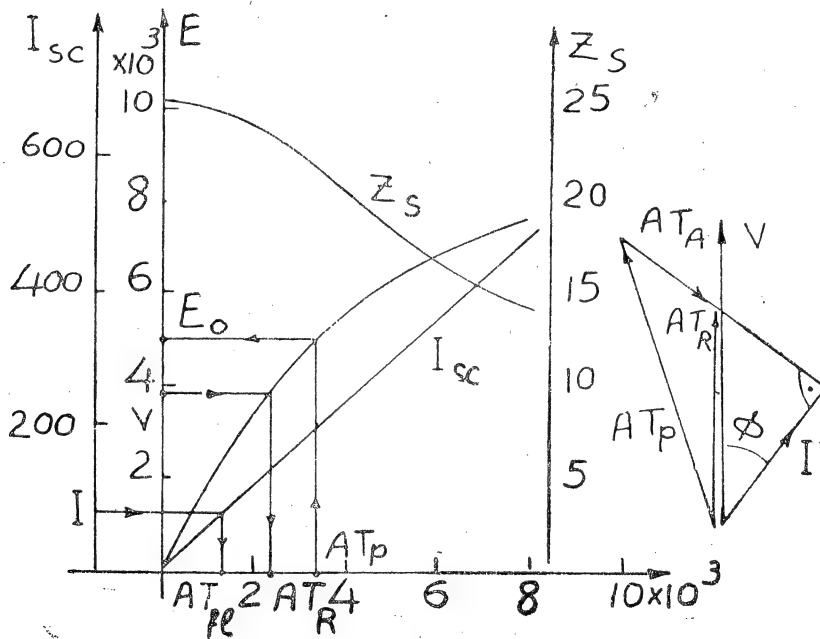
وهي قيمة مبالغ فيها جداً ، وأكبر بكثير من الحقيقة ، كما سبق ذكره عند شرح هذه الطريقة . وتذكراً هذه المبالغة بسبب رصد IZ_s على الجزء المستقيم من منحنى الدائرة المفتوحة ، بينما يجب أن تكون Z_s محسوبة على الجزء المنحني ، أي في منطقة التشبع ، لأن هذا أقرب إلى الواقع العملي .

3 — A 1000 KVA, 6600 V, 3 phase, star connected
synchronons generator has the following open and short
circuit characteristics :

Field amp. turns	0	1100	3300	5500	7700
Induced E.M.F/phase	0	1880	4950	6600	7520
Short circuit current	0	75	225	375	525

Find the regulation of the machine when running on full load 0.8 power factor lagging.

نستخدم طريقة الأمبير لفات البسيطة للحصول على معامل التنظيم ، ولا نحتاج في هذه الحالة إلى هبوط الضغط في كل من X_s و R_a ، كما كان الأمر في المثال السابق ، لأننا نحصل من منحني خواص القصر على AT_H ، وهي التي تساوي مجموع AT_A و AT_R ، بحيث تكون AT_R منازرة للضغط V . نحصل على AT_p من مخطط المتجهات باستخدام AT_R و AT_H ، كما هو مبين في شكل (٢-١٦) .



شكل (٢-١٦)

$$V = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3810 \text{ V} , AT_R = 2400$$

$$I = \frac{1000 \times 1000}{\sqrt{3} \times 6600} = 87.5 \text{ A} , AT_H = 1285$$

$$AT_P = 3350 , E_o = 5000 \text{ V}$$

$$\varepsilon = \frac{5000 - 3810}{3810} = 0.304 = 30.4 \%$$

يمكن حساب معامل التنظيم في هذه الحالة أيضا ، كما سبق في المثال الأول ، باستخدام طريقة المعاوقة المتزامنة . ونستطيع أن نحصل على نتيجة أفضل في هذا المثال باستخدام معاوقة التزامن المحسوبة في منطقة التشبع ، ونحصل عليها ، كما في شكل (١٦-٣) ، بقسمة قراءات منحنى الدائرة المقفوحة على قراءات منحنى خواص القصر المناظرة على النحو التالي :

$$AT : 1100 \quad 3300 \quad 5500 \quad 7700$$

$$Z_s : 25 \quad 22 \quad 17.65 \quad 14.35$$

نستطيع أن نهمل تأثير R_a (لعدم وجودها في المسألة) ، ويتضح من المثال السابق أن ذلك لن يغير في النتيجة شيئا .

$$IX_s \approx IZ_s = 14.35 \times 87.5 = 1256 \text{ V}$$

$$E_o \approx \sqrt{(V \cos \phi)^2 + (V \sin \phi + IX_s)^2}$$

$$\approx \sqrt{(3048)^2 + (2286 + 1256)^2} \approx 4680 \text{ V}$$

$$\varepsilon = \frac{4680 - 3810}{3810} = 0.222 = 22.2 \%$$

وهي أقل من القيمة التي حصلنا عليها أولا . وقد نشأ ذلك نتيجة لاستخدامنا

أقل قيمة لـ Z_p في منطقة التشبع ، بينما حصلنا في المثال الأول على قيمة عالية جداً ، نتيجة لاستخدامنا أعلى قيمة لـ Z_p في منطقة الخط المستقيم لمنحنى الدائرة المفتوحة . ويتركز عيب طريقة معاودة التزامن ، في الحصول على معامل التنظيم ، على هذا التذبذب الكبير في النتائج التي تعطىها ، على حسب قيمة Z_p التي نستخدمها ، حيث تختلف قيمة Z_p اختلافاً كبيراً في منطقة الحساب ، كما يظهر في شكل (١٦-٣) . لذلك يفضل عدم استخدام هذه الطريقة للحصول على معامل التنظيم . وفي الواقع أننا لا نلجأ إلى استخدام Z_p (أو X_p) ، في الحسابات الخاصة بالآلات المتزامنة ، إلا عند عمل تحليل نوعي (qualitative analysis) ، لكي نحصل على نتائج نوعية (qualitative results) ، وهي نتائج تبين لنا كيف تسير الأمور فقط ، وفي أي اتجاه تتطور العلاقة بين الحدود المختلفة ، بصرف النظر عن النتائج الكمية (quantitative results) ، التي تربط بين هذه الحدود ربطاً حسابياً صحيحاً ، عند عمل تحليل كمي (quantitative analysis) ، كما ستفعل في الباب التالي . فإذا أردنا تحويل النتائج النوعية إلى نتائج كمية سليمة ، يجب علينا قياس Z_p (أو X_p) تحت ظروف التشغيل الموجودة .

4 — A 3-phase, salient pole synchronous generator is rated at 1200 KVA and 6600 Volts. The armature has 9 slots per pole, each containing 6 conductors, and the open circuit characteristic of the machine was obtained by the following points at normal speed;

phase e.m.f.	: 2890	3460	4040	4610 V
Exciting current :	17	2.15	28	41 A

The rotor has 125 turns per pole and the leakage reactance drop in the armature is 10 % of normal voltage. assuming a ratio of pole arc to pole pitch of

0.67, find the regulation for full load, 0.8 power factor lagging.

تستخدم في هذه الحالة طريقة رد فعل المنتج برسم خطط المتجهات للآلة ذات الاقطاب البارزة ، كما في شكل (١٢-٣ب). ونطبق المعادلة (١٥-٢) للحصول على كل من α_c و α_d بمعرفة $\alpha_i = \frac{2}{3}$ (نحصل على نفس القيم تقريبا من شكل (١٥-٢) :

$$\alpha_c = \frac{\frac{2}{3} \pi - \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{3}}{4 \frac{\sqrt{3}}{2}} = 0.45 ,$$

$$\alpha_d = \frac{\frac{2}{3} \pi + \frac{\sqrt{3}}{2}}{4 \frac{\sqrt{3}}{2}} = 0.855$$

$$I = \frac{1200 \times 1000}{\sqrt{3} \times 6600} = 105 \text{ A} , V = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3810$$

$$\alpha = \frac{360 \times p}{8} = \frac{180}{3q} = \frac{180}{9} = 20^\circ ,$$

$$q = \frac{9}{3} = 3$$

$$k_w = k_d = \frac{\sin 30}{3 \sin 10} = 0.96$$

$$\frac{T_{ph}}{p} = \frac{3p \times 2p u}{2 \times 3 \times p} = qu = 3 \times 6 = 18$$

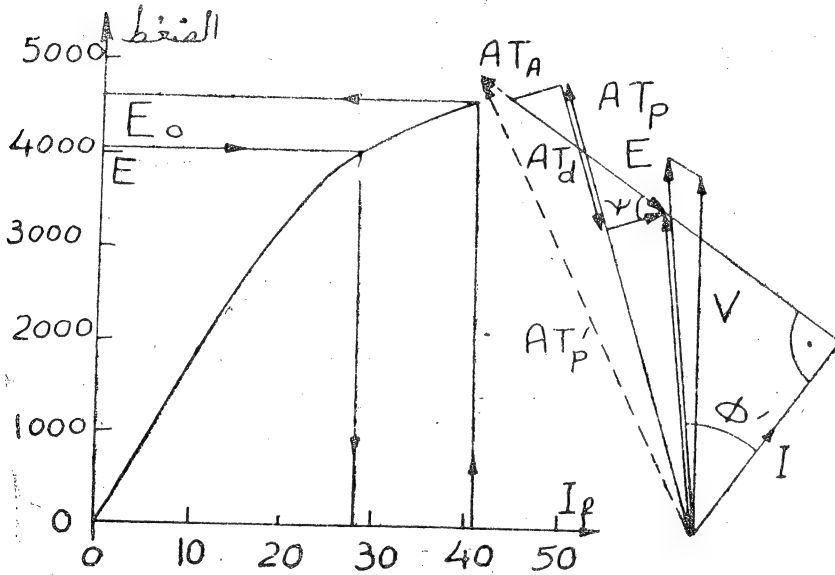
$$AT_A = 1.35 \times 18 \times 105 \times 0.96 = 2445 \text{ أمبير لفة/قطب}$$

$$AT_c = \alpha_c AT_A = 0.45 \times 2445 = 1100$$

$$AT_d = \alpha_d AT_A = 0.855 \times 2445 = 2090$$

يحمل تأثير R_a ويؤخذ IX_1 من طرف V عمودياً على I ، وبذلك نجد أن :

$$E = \sqrt{(V \cos \phi)^2 + (V \sin \phi + IX_1)^2}$$



شكل (١٧-٣)

$$IX_1 = 0.1 V = 381 V$$

$$E = \sqrt{(3048)^2 + (2286 + 381)^2} = 4050$$

تيار التنبيه المناظر لـ E يساوي 28 أمبير ، وبضربه في 125 عدد اللفات على كل قطب نحصل على AT_R ويساوي 3500 أمبير لفة على كل قطب . يرسم خطوط المتجهات بمعرفة AT_R و AT_c و AT_d ، كما سبق شرحه بالنسبة لشكل (١١-٣) ، والشكل المعدل (١٢-٣) ، وذلك كما هو مبين في شكل (١٧-٣) :

$$\phi' = \tan^{-1} \frac{2667}{3048} \cong 41^\circ$$

$$AT_p = 5100 \quad , \quad I_f = \frac{5100}{125} = 40.8 \text{ A} \quad E_o = 4600 \text{ V}$$

$$\varepsilon = \frac{4600 - 3810}{3810} = 0.207 = 20.7 \%$$

يمكن حل المسألة حلا تقريبا ، دون الحاجة إلى استخدام α_c و α_d ، وذلك باهمال بروز الأقطاب (neglect effect of saliency) ، وهذا يعنى أن نرسم مخطط المتجهات على نمط مخطط متجهات الآلات التوربينية ، كما فى شكل (١٢) — (٣ أ) ، أو أن نستخدم طريقة الأمبير لفات البسيطة بمعنى آخر . يتكون مخطط متجهات الأمبير لفات فى هذه الحالة من AT_R التى حصلنا عليها ، وتساوى 3500 أمبير لفه على كل قطب ، و AT_A التى حسبناها وتساوى 2445 أمبير لفه على كل قطب ، ثم AT'_p الناتجة منهما ، وهى تساوى 5500 أمبير لفه على كل قطب (المتجه المنقطع شكل (١٧-٣)) . نجد أن تيار التنبيه I'_f تصبح قيمته $\frac{5500}{125} = 44.1$ ، بينما تكون $E_o = 4700$. وهذا يعطى معامل تنظيم قيمته 0.23 أو 23 % . أى أننا نحصل على قيم أعلى لتيار التنبيه ومعامل التنظيم عند اهمال بروز الأقطاب ، وهذا يفسر لنا لماذا يكون معامل التنظيم فى الآلات التوربينية أعلى منه عادة فى الآلات ذات الأقطاب البارزة المناظرة .

- 5 - A 5000 KVA, 6600 V, 3 — phase, star — connected alternator has a resistance of 0.075 ohm per phase. Estimate by the zero power — factor method the regulation for a load of 500 amps at power factor of (a) unity, (b) 0.9 leading, (c) 0.71 lagging, from the following open — circuit and full — load, zero — power — factor curves ;

field current amps.	32	50	75	100	140
induced line (phase) e.m.f., Volts	3100 (1795)	4900 (2840)	6600 (3815)	7500 (4340)	8300 (4800)
saturation curve zero p.f., Volts	0	1850 (1069)	4250 (2455)	5800 (3350)	7000 (4045)

Find also the armature leakage reactance and the armature reaction ampere turns at full load, if there are 150 turns on each pole.

القيم المعطاة بين قوسين للضغط المرحلي المناظر، وهي جزء من الحل، إذ أن المعطى في رأس المسألة هو قيم الضغط الخطي، ويجب أن يكون الحل دائماً على أساس القيم المرحلية، حتى لا يحدث خطأ. نحصل على $I Z_s$ من شكل (١٨-٣).

$$V = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3815 \text{ V} , \quad I Z_s = 825 \text{ V}$$

$$I = \frac{5000 \times 1000}{\sqrt{3} \times 6600} = 437 \text{ A}$$

$$Z_s = \frac{825}{437} = 1.89 \Omega ,$$

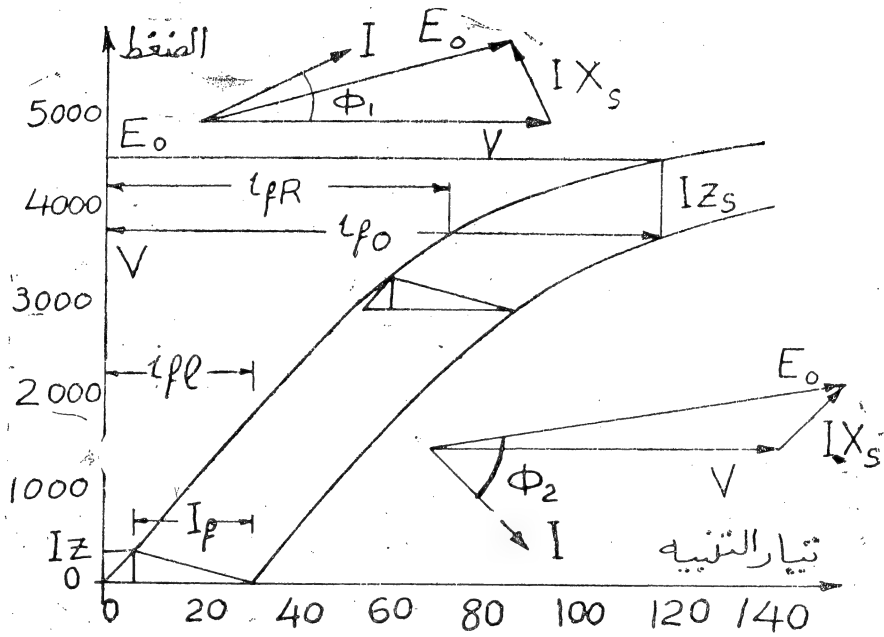
$$X_s = \sqrt{(1.89)^2 - (0.07)^2} \approx 1.89 \Omega$$

$$(a) \text{ unity p.f. : } E_o = \sqrt{(V + I R_a)^2 + (I X_s)^2} ,$$

$$I = 500 \text{ A}$$

$$E_o = \sqrt{(3815 + 37.5)^2 + (950)^2} = 3977$$

$$\epsilon = \frac{3970 - 3815}{3815} = 0.0407 = 4.07 \%$$



شكل (١٨-٣)

(b) 0.9 leading

نحل هذا الجزء بالرسم كما هو مبين في شكل (١٨-٣) حيث :

$$\Phi_1 = 25^\circ 45' , E_o = 3500 \text{ V}$$

$$\epsilon = \frac{3500 - 3815}{3815} = -0.0825 = -8.25 \%$$

(c) 0.71 lagging

نحل هذا الجزء بالرسم أيضا هو مبين في شكل (١٨-٣) حيث :

$$\Phi_2 = 45^\circ , E_o = 4550$$

$$\varepsilon = \frac{4550 - 3815}{3815} = 0.193 = 19.3 \%$$

نحقق هذه النتيجة بالحساب كما يأتي :

$$E_o = \sqrt{(V \cos \phi + IR_a)^2 + (V \sin \phi + IX_s)^2}$$

$$= \sqrt{(2690 + 37.5)^2 + (2690 + 950)^2} = 4557$$

$$\varepsilon = \frac{4550 - 3815}{3815} = 0.193 = 19.3 \%$$

للحصول على ممانعة التسرب ورد فعل المنتج نفثوى مثلث بواتيه ، بالطريقة
التي شرحناها سابقا ، وكما هو مبين في شكل (١٨ - ٣) ، فنحصل على النتائج
الآتية :

$$IZ = 350 \text{ V} , Z = \frac{350}{437} = 0.8 \Omega$$

$$X_1 = \sqrt{Z^2 - R_a^2} \approx 0.8$$

تيار التنبيه المناظر لرد فعل المنتج عند الحل الكامل :

$$I_f = 32 - 6 = 26 \text{ A}$$

$$AT_A = 26 \times 150 = 3900 \text{ أمبير لفة/قطب}$$

ملحوظة : يستخدم لإيجاد معامل التنظيم في مثل هذه المسألة مخطط يطلق عليه
اسم المخطط السويدي (swedish diagram) ، ويتم تكوينه واستخدامه ، كما
هو مبين في شكل (١٩ - ٣) ، على النحو التالي :

i_{f0} تيار التنبيه المناظر للامبير لفات AT_R ويمثله OB ، i_{fR} تيار التنبيه
المناظر للامبير لفات AT_o ويمثله OQ (AT_o هي الامبير لفات اللازمة للحصول

مسائل على الباب الثالث

- 1 — The effective resistance of a 2200 — V, 50 — cycle, 440 — KVA, 1 — Phase alternator is 0.5Ω . On short — circuit a field current of 40 A gives the full — load current of 200 A. The electromotive force on open — circuit with the same field excitation is 1160 V.

Calculate the synchronous impedance and reactance.

- 2 — If a field excitation of 10 A in a certain alternator gives a current of 150 A on short — circuit and a terminal voltage of 900 V on open — circuit, find the internal voltage drop with a load current of 60 A.

- 3 — A 550 — V, 55 — K V A, 1 — phase alternator has an effective resistance of 0.2Ω . A field current of 10 A produces an armature current of 200 A on short — circuit and an electro — motive — force of 450 V on open — circuit. Calculate (a) The synchronous impedance and reactance, and (b) The full — load regulation with power factor 0.8 lagging.

- 4 — Determine the voltage regulation of a 2000 — V, 1 — phase alternator giving a current of 100 A at (a) unity power factor, (b) power factor 0.8 leading, and (c) power factor 0.71 lagging, from the test results : — Full — load current, 100 A, is produced on short — circuit by a field excitation of 2.5 A. An electromotive force of 500 V is produced on open

circuit by the same excitation. The armature resistance is 0.8Ω .

5 — A 1500 K V A, 6600 — V, 3 — phase, star — connected alternator with a resistance of 0.4Ω and reactance of 6Ω per phase, delivers full — load current at power — factor 0.8 lagging, and normal voltage. Estimate the terminal voltage for the same excitation and load current at 0.8 power factor leading.

6) Define the voltage regulation of a synchronous generator and mention the factors which affect it.

A 1000 KVA, 3 phase, 50 c/s, star connected alternator has a voltage regulation of 25 % when its terminal voltage is 3300 V and driven at 375 r.p.m. The number of slots per pole per phase is 3 and the winding factor is 0.96. If the flux per pole is 5.81 megalines, calculate, the number of conductors per slot. Draw the short circuit characteristic of the machine assuming it to be a straight line.

7 — Explain how a rotating field is produced in a 3 phase synchronous machine.

A 3 phase, 6600 V, 12 pole, star connected synchronous generator with a total number of slots of 108 and 6 conductors per slot, gave the following open circuit characteristic at normal speed :

Induced E.M.F per phase	0	1880	4950	6600	7520	8180
Field amp. turns per pole	8	1100	3300	5500	7700	9900

Find the percentage regulation of the machine when delivering an output of 1400 KVA at 0.8 power factor lagging.

Take distribution factor 0.96, and neglect armature leakage reactance and resistance drops.

- 8 — The open circuit test on a 1800 KVA 3 phase, 50 c/s, 6600 V, 8 pole, star connected synchronous generator gave the following open circuit characteristic at normal speed :

Induced E.M.F./phase	0	2175	3152	4000	4500	4900
Ampere turns/pole	0	1000	2000	3500	5000	7000

The armature has 72 slots and 5 conductors per slot. The field winding has 180 turns per pole. Resistance and leakage reactance drops are neglected. (a) Find the field current and percentage regulation at full load 0.8 p.f. lagging, (b) Sketch the winding arrangement for 4 poles.

- 9 — A 2000 KVA, star connected, 50 c/s, 6600 V alternator with 48 poles has 228 turns in series per phase. The winding factor is 0.96. The saturation curve at rated speed is as follows ;

Induced E.M.F./phase	0	6000	6600	7200	7800
Ampere turns/pole	0	4750	5720	6800	8500

Find the regulation for full load at 0.8 power factor lagging.

- 10 — A 1250 KVA, 3 phase, star connected, 50 c/s synchronous generator runs at 300 r.p.m. and has a terminal voltage of 3300 V at full load. The stator has a total number of slots of 180, each containing 5 conductors and the no load saturation curve is as follows :

Induced E.M.F, volts/phase	1500	1900	2100	2300
Field current, amps	56	81	106	158

The field winding has 60 turns per pole and the armature has a leakage reactance per phase of 1.2 ohms and negligible resistance.

Find the regulation for full load at 0.8 power factor lagging.

11 — Describe one method for synchronising a synchronous machine on an infinite busbar system.

A 1500 KVA, 6600 V, 3 phase synchronous generator has the following open circuit and short circuit characteristics :

Line voltage	0	1815	3620	4940	5940	6600	7400	7920
Short circuit current	0	57.8	115.6	173.3	—	—	—	—
Field amp. turns/pole	0	1100	2200	3300	4400	5500	7150	8800

Find the regulation at full load 0.8 power factor lagging.

12 — A 5000 K.V.A., 6600 V, 50 c/s, 3 phase, star connected alternator runs at 250 r.p.m. and has the following saturation curve :

Exciting current (amps)	0	100	150	200	250	400
Induced E.M.F.(line value)	0	4800	6550	7500	8000	8700

The armature has 360 slots with two conductors per slot.

The effective armature resistance and leakage reactance are 0.042 ohm and 1.01 ohms respectively. If the field winding has 68 turns per pole, find the regulation

for full load 0.8 power factor lagging.

13 — a — A salient pole machine is more stable than a machine with a cylindrical rotor. Discuss this statement in detail.

a 3 — phase delta connected synchronous generator rated at 1875 KVA, 480 volts, 60 c/s, 3600 r.p.m. has an open — circuit characteristic determined by the following data :

Field Amp	20	40	60	80	100	120	140
Line voltage	222	435	553	600	625	642	656

The stator winding, consisting of single turn coils, is disposed in 15 slots/pole. There is one coil side in every slot and the coil span is $\frac{2}{3}$ of the pole pitch. The stator resistance measured between two terminals is 0.00145 ohm, and leakage reactance is 0.098 ohm/phase. The field winding has 214 turns/pole. Find the regulation for full load current at 0.707 p.f. lagging. Why are the coils chorded by one third of a pole pitch ?

14 — Describe the connections usually employed in a generating station for the purpose of synchronising any of the generators with the infinite bus bars.

The open circuit test on a 3 phase, 50 c/s, 6600 V, 8 pole, star connected synchronous generator gave the following open circuit characteristic at normal speed :

Induced E.M.F/phase	0	2175	3152	4000	4500	4900
Ampere turns/pole	0	1000	2000	3500	5000	7000

The armature has 96 slots and 4 conductors per slot. The

field winding has 180 turns per pole and the leakage reactance drop is 10 %. If the machine is delivering an output of 1650 KVA at 0.8 power factor lagging, find the field current and the percentage regulation.

- 15 — The field from of a 3 phase, 50 c/s alternator measured from the neutral plane to the middle of the pole is as follows :

distance in cms.	0	1	2	3	4	5	6	7	10
induction in air gap (lines/sq. cm.)	0	350	2000	4200	7100	9000	9000	9000	9000

The curve is symmetrical about the centre. The alternator has 8 poles and 72 slots, with 10 conductors in each slot. The active length of the conductor is 40 cms.

- (a) Find the phase and line E.M-Fs. of the star connected alternator. (b) Sketc the winding arrangement of the armature, being single layer with two plane end turns.

- 16 — Draw diagrams giving the armature M. M. F. distribution of a 3 phase machine at two different instants and prove that the fundamental component rotates in space at the same speed of the poles.

A 3 phase, 6600 V, star connected synchronous generator, with 9 slots per pole and 6 condutors per slot, gave the following open circuit characteristic at normal speed :

Field current (amps)	14	18	23	30	43
Terminal volts	4000	5000	6000	7000	8000

The field winding has 150 turns per pole and the leakage

reactance of the armature is 8 %. Determine the field current when the machine is delivering an output of 2000 KVA at 0.8 power factor lagging.

- 17 — A 1000 KVA, 6600 V, 3 phase, star connected synchronous generator has the following open and short circuit characteristics :

Field amp. turns	0	1100	3300	5500	7700	9900
Induced E.M.F./phase	0	1880	4950	6600	7520	8180
Short circuit current	0	75	225	375	525	

If the reactance drop is 8 % and the resistance drop is 2 % of the normal voltage, find the regulation of the machine when running on full load 0.8 power factor lagging.

- 18 — Determine the voltage regulation of a 2000 volts, 1 — phase alternator giving a current of 100 A at

- (a) unity power factor (b) power factor leading 0.71
(c) power factor 0.71 lagging.

From the test results : Full load current, 100 A is produced on shortcircuit by a field excitation of 2.5 A, an E.M.F. of 500 V is produced on open—circuit by the same excitation. The armature resistance is 0.8 ohm.

- 19 — A 5000 K.V.A., 6600 V, 3 — phase, star connected alternator has a resistance of 0.075 ohm per phase. Estimate by the Z.P.F. method the regulation for a load of 500 A at power factors (a) unity, (b) 0.9 leading, (c) 0.71 lagging, from the following open — circuit and full load. Z.P.F. curves :

Field current A,	Open circuit terminal voltage V	Saturation curve Z.P.F., V
32	3100	0
50	4900	1850
75	6600	4250
100	7500	5800
140	8300	7000

20 — The table gives data for open—circuit, short—circuit and full—load Z.P.F. measurments on a 6 pole, 440volts, 50cycles, 3— phase, star connected alternator.

The effective ohmic resistance per phase is 0.15 ohm.

Field Current A	2	4	6	7	8	10	12	14
O.C. ter. Volts	156	288	396	440	471	530	568	592
S.C. Current A	11.4	22.8	34.2	40	45.6	57	68.4	80
Z.P.F. ter Volts				0	80	206	314	398
	16	18						
	610	625						
	—	—						
	460	504						

Determine the percentage regulation for full—load output of 40 A at rated voltage and 0.8 power factor lagging, by synchronous impedance and ampereturns methods and from Z.P.F. curve, by Potier triangle method. Determine also the leakage reactance of the machine and field current to overcome armature reaction.

21 — A 1000 K.V.A. 11000 V, 3—phase, star—connected alternator has an effective resistance of 2Ω per phase. The characteristics on open circuit and with full load current at zero power factor, and the open circuit

core losses are :

Field current A	o c.c. ter V	core loss KW	zero p. f. V
40	—	—	—
50	7000	7.5	—
110	12500	16.6	8500
140	13750	22.4	10500
180	15000	33.5	12400

Deduce by the zero — power — factor method (a) the percentage regulation for full load at a lagging power factor of 0.8. Find also (b) the efficiency at this load, given that the field circuit has a resistance of 0.5 ohm and that the mechanical losses amount to 10 KW

الباب الرابع

خواص تشغيل الآلات المتزامنة

(Operation Characteristics of synchronous machines)

أولاً - اوتز المتزامنة على حمل منفصل

(Synchronous Machine on isolated load)

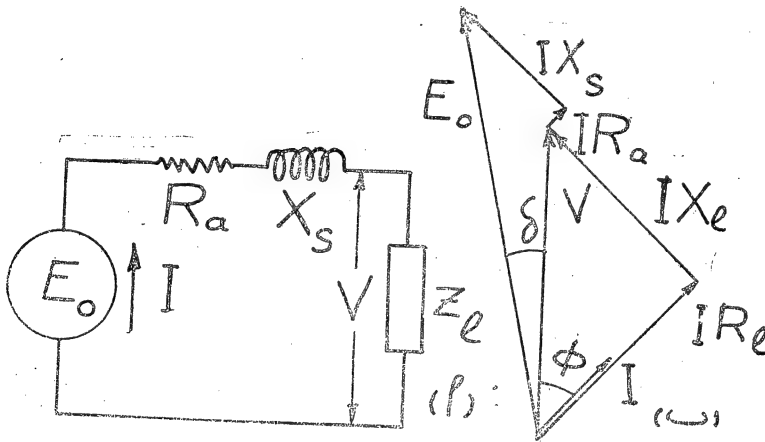
تشغيل الآلة المتزامنة بممانعة التزامن ثابتة :

(operation of synchronous machine with constant synchronous reactance) :

سبق تعريف ممانعة التزامن . وهى ليست ثابتة القيمة ، إلا فى الجزء الخطى من منحنى الدائرة المفتوحة ، كما يظهر فى شكل (١٦ - ٣) . وهذا يعنى أننا نستطيع أن نفترض أن ممانعة التزامن ثابتة القيمة ، إذا أهملنا ظاهرة التشبع فى الدائرة المغناطيسية للآلة . وهو إجراء نلجأ إليه ، فى كثير من الأحوال ، حتى يمكننا تحليل بعض الظواهر الخاصة بالآلات الكهربائية ، وذلك عندما يقف منحنى الدائرة المفتوحة ، الذى لا نستطيع التعبير عنه بمعادلة رياضية ، حائلاً دون الحصول على تحليلات رياضية متسلسلة . وفى هذه الحالة يكون التحليل نوعياً ، وليس كمياً ، بمعنى أننا نستطيع أن نستخلص من النتائج بعض القواعد العامة ، ولكننا لا نستطيع أن نحزم بصحة هذه النتائج من الناحية الحسابية البحتة . وقد نلجأ أحياناً إلى عمل بعض القياسات ، وتعديل النتائج التى حصلنا عليها ، على

هذه ما يتمخض عن هذه القياسات ، بحيث نستطيع الاطمئنان في النهاية إلى أن النتائج قد استقامت مع الحسابات الصحيحة .

إن اعتبار الآلة المتزامنة ذات معاوقة تزامن ثابتة القيمة ، يمكننا في الواقع من دراسة خواص تشغيلها باستخدام دائرة كهربائية بسيطة ، مكونة من القوة الدافعة الكهربائية E_o ، موصلة مع معاوقة التزامن ومعاوقة الحمل على التوالي ، كما هو مبين في شكل (١ - أ) . نفترض أولاً أن تيار التنبيه قد ثبت عند قيمة معينة في هذه الحالة ، مما يعني ثبوت قيمة E_o ، ونبحث في تأثير تغيير الحمل ، ومعامل قدرة الحمل ، على الملامح المختلفة لخواص تشغيل الآلة ، وأهمها بالنسبة للدول الضغط الطرفي ومعامل التنظيم .



شكل (١ - أ)

فإذا فرضنا أن المولد يدور بسرعة التزامن الثابتة ، وأن تيار التنبيه قد ثبت عند قيمة معينة ، بحيث نحصل على قوة دافعة كهربائية ثابتة معينة قيمتها E_o ، فإن الضغط الطرفي V ، الذي يعادل هبوط الضغط $I Z_l$ في معاوقة الحمل Z_l ، يتوقف على قيمة

تيار الحمل I ، وزاويته المرحلية ϕ مع هذا الضغط ، وكلاهما يتوزف بدوره على قيمة المعاوقة Z_1 ، وطبيعتها ، كما هو مبين في مخطط المتجهات في شكل (١-٤) . ويمكننا ، في هذه الحالة ، باعتبار معاوقة التزامن Z_s ثابتة ، ربط الحدود المختلفة في الدائرة بالعلاقات الاتجاهية الآتية ، وذلك بالرجوع إلى مخطط المتجهات ، وعلى أساس أن كل حد يمثل كمية موجهة (Vector)^(١) .

$$\dot{E}_o = \dot{V} + \dot{I} Z_s \quad , \quad \dot{V} = \dot{E}_o - \dot{I} Z_s = \dot{I} (R_1 + jX_1)^*$$

$$\dot{V} = \dot{I} Z_1 \quad , \quad \dot{E}_o = \dot{I} (Z_1 + Z_s) \quad \dots \dots \dots (١-٤)$$

$$E_o = \sqrt{(V \cos \phi + IR_a)^2 + (V \sin \phi + IX_s)^2}$$

$$E_o^2 = (IR_1 + IR_a)^2 + (IX_1 + IX_s)^2 \quad \dots \dots (١-٥)$$

نستطيع تتبع الطريقة التي يتغير بها الضغط الطرفي V ، باعتبار حمل ذي معامل

قدرة معين وثابت $\left(\phi = \tan^{-1} \frac{X_1}{R_1} \right)$ ، وتغير قيمة I في المعادلة

(١-٥) ، فنحصل على مجموعة المنحنيات المبينة في شكل (٢-٤) . ويمكن

الحصول على كل من المنحنى الخاص بمعامل قدرة صفر ، والمنحنى الخاص بمعامل

قدرة الواحد الصحيح ، بتبسيط المعادلة (١-٥) ، وذلك بإهمال المركبة الخاصة

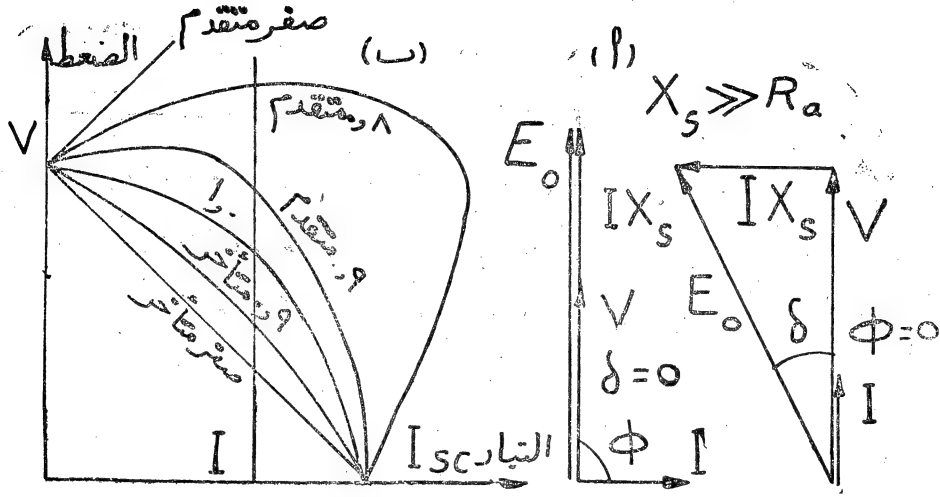
بهبوط الضغط في مقاومة ملفات المنتج IR_a ، فنحصل تبعاً لشكل (٢-٤ أ) على

المعادلتين المبسطتين :

(١) سوف نضع نقطة فوق الحرف عند اعتباره كمية موجهة .

* تكون X_1 سالبة أو موجبة $\left(X_1 = \omega L = - \frac{1}{\omega C} \right)$ على حسب

ما إذا كانت ممانعة سميوية أو حثية .



شكل (٢-٤)

معادلة خط مستقيم $V \approx E_0 - IX_s \rightarrow$ معامل قدرة صفر

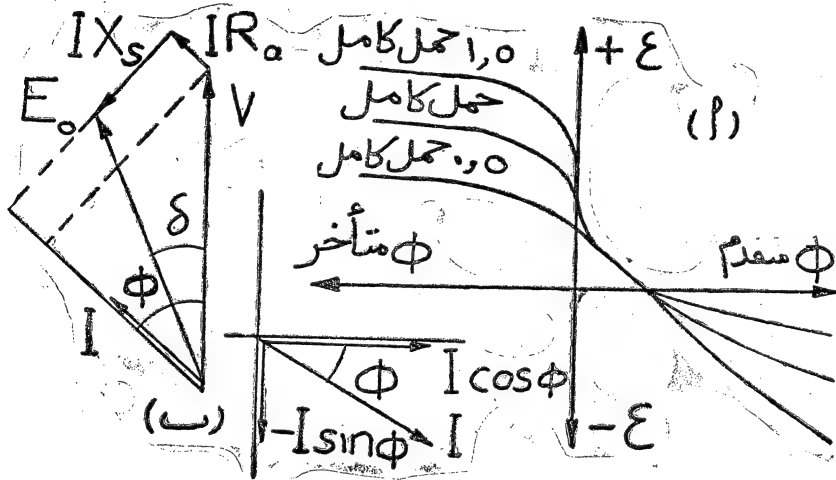
معادلة قطع ناقص $V^2 + (IX_s)^2 \approx E_0^2 = \text{constant} \rightarrow$ معامل قدرة واحد

ونحصل في جميع الحالات على نفس تيار القصر I_{sc} ، وذلك بوضع V يساوى صفراً (أو Z_1 أيضا يساوى صفراً) في المعادلتين (٢-٤) ، (١-٤) ، حيث :

$$I_{cs} = \frac{E_0}{Z_s} , \quad I_{cs} = \frac{E_0}{Z_s}$$

وتبلغ قيمة تيار القصر I_{sc} حوالى 150% من تيار الحمل الكامل، في الآلات الحديثة ، وقد تقل عن ذلك أيضا بالنسبة للآلات التوربينية الكبيرة ، حيث يراعى عدم تأثرها ببعض الأخطاء (faults) التي تحدث في مجموعات القدرة الكبيرة (Big power systems) .

وتتغير قيمة معامل التنظيم ε بتغير قيمة الضغط الطرفي V ، بطبيعة الحال ، ويمكننا حسابها بالتعويض من المعادلة (٢ - ٤) في معادلة معامل التنظيم $\varepsilon = \frac{E_0 - V}{V}$. ونحصل على المنحنيات التي تربط بين قيمة معامل التنظيم وتيار الحمل ، عند القيم المختلفة لمعامل القدرة ، بطريقة مشابهة لتلك التي اتبعناها في حالة منحنيات الضغط ، وذلك من حيث تثبيت تيار الحمل عند قيمة معينة ، وتغيير معامل القدرة للحصول على منحنى بعينه ، ويبين شكل (٣ - ٤) هذه المنحنيات .



شكل (٣ - ٤)

ملحوظة هامة : يجب ملاحظة أن كلا من IR_0 و IX_s الواردة في مخطط المتجهات ، بالإتجاه المعطى ، ليست هي هبوط الضغط في مقاومة ملفات المنتج ، وبماقتها لكل مرحلة ، على الترتيب ، وإنما هي مركبة الضغط E_0 اللازمة لمعادلة هذا الهبوط ، كما سبقت الإشارة إليه من قبل . لذلك يجب ، عند التعويض عن

قيمة ϕ في المعادلة (٢-٤) ، أن تكون موجبة ، في حالة معامل القدرة المتأخر ، وسالبة في حالة معامل القدرة المتقدم . وهذا هو عكس ما نفعل للحصول على المتجه I ، للتعويض في المعادلة (١-٤) ، حيث يكون $I = I \cos \phi - j I \sin \phi$ في حالة معامل القدرة المتأخر ، ويكون $I = I \cos \phi + j I \sin \phi$ في حالة معامل القدرة المتقدم . شكل (٣-٤) ب) يوضح كل ذلك .

بدراسة كل من شكل (٢-٤) و (٣-٤) أ) نحصل على النتائج النوعية الآتية : عند تشغيل المولد المتزامن بتيار تنبيهه ثابت يقل الضغط الطرفي V ، وتزداد بالتالي قيمة معامل التنظيم ، كلما زادت قيمة تيار الحمل ، وذلك عندما يكون معامل القدرة متأخرا ، بحيث يزداد معدل الانخفاض في قيمة الضغط الطرفي ، والازدياد في قيمة معامل التنظيم كلما قلت قيمة معامل القدرة المتأخر . ويكون معامل التنظيم ذا قيمة موجبة في هذه الحالة .

عندما يصبح معامل القدرة متقدما تزداد قيمة الضغط الطرفي (بالنسبة للاحمال التي تقل كثيرا أو قليلا عن الحمل الكامل) ويصبح معامل التنظيم ذا قيمة سالبة ، ويزداد معدل الارتفاع في قيمة الضغط الطرفي ، وكذلك معدل الازدياد في قيمة معامل التنظيم السالبة ، كلما قلت قيمة معامل القدرة المتقدم . هذا ويستطبع أن نحصل على ضغط طرفي ثابتة القيمة تقريبا ، ومعامل تنظيم يساوى الصفر ، عند معامل قدرة متقدم قريب من الواحد الصحيح ، وذلك عند الحمل الكامل ، والاحمال التي تقل عن ذلك .

حساب الضغط الطرفي ومعامل التنظيم عند حمل معين :

إذا كان معلوما لدينا قيمة التيار I ، وزاوية اختلافه المرحلي ϕ مع الضغط الطرفي V ، يمكننا حساب قيمة V من المعادلة (٢-٤) ، وذلك بعد الحصول على قيمة E_o من منحنى الدائرة المفتوحة للآلة ، بمعرفة قيمة تيار التنبيه I_f (أو الأمبير لفات على كل قطب $I_f N_f$) ، الذي نفترض أنه يظل ثابتا . وفي هذه الحالة لا بد أن تكون لدينا قيمة معلومة لكل من R_a و X_s (يمكن إهمال R_a واعتبار أن $Z_s = X_s$ في أحيان كثيرة) . ويمكن حل المسألة بالرسم بالطريقة المبينة في شكل (١٣-٢) ، التي سبق توضيحها .

وفي بعض الأحيان يكون معلوما لدينا قيمة القدرة للفعالة للحمل P ، بالوات لكل مرحلة ، بدلا من قيمة التيار ، ومعامل قدرة الحمل $\cos \phi$ ، ويتعين علينا تحديد قيمة الضغط الطرفي V ، مع وجود بقية المعلومات السابقة . ويكون الحل في هذه الحالة على النحو التالي :

$$P = VI \cos \phi \quad , \quad I = \frac{P}{V \cos \phi} \quad \dots\dots (٢-٤)$$

$$\therefore IR_a \times V \cos \phi = PR_a \quad \dots\dots\dots (٤-٤)$$

$$Q = VI \sin \phi \quad , \quad Q = P \tan \phi \quad \text{VAR}$$

$$\therefore IX_s \times V \sin \phi = QX_s \quad \dots\dots\dots (٤-٥)$$

بفك حدى الطرف الايمن للمعادلة (٢-٤) نجد أن :

$$E_o^2 = V^2 + 2 IR_a \times V \cos \phi + 2 IX_s \times V \sin \phi + I^2 (R_a^2 + X_s^2) \quad \dots\dots\dots (٤-٦)$$

بالتعويض من المعادلات (٢-٤) ، (٤-٤) ، (٤-٥) في المعادلة

(٤-٦) ، وضرب المعادلة الجديدة في V^2 ، نجد أن :

$$V^4 - [E_o^2 - 2(P R_a + Q X_s)] V^2 + (R_a^2 + X_s^2) \left(\frac{P}{\cos \phi} \right)^2 = 0 \dots\dots (٤-٧)$$

وهذه معادلة من الدرجة الثانية في V^2 على النمط :

$$a (V^2)^2 + b V^2 + C = 0$$

$$a = 1$$

$$b = - [E_o^2 - 2(P R_a + Q X_s)]$$

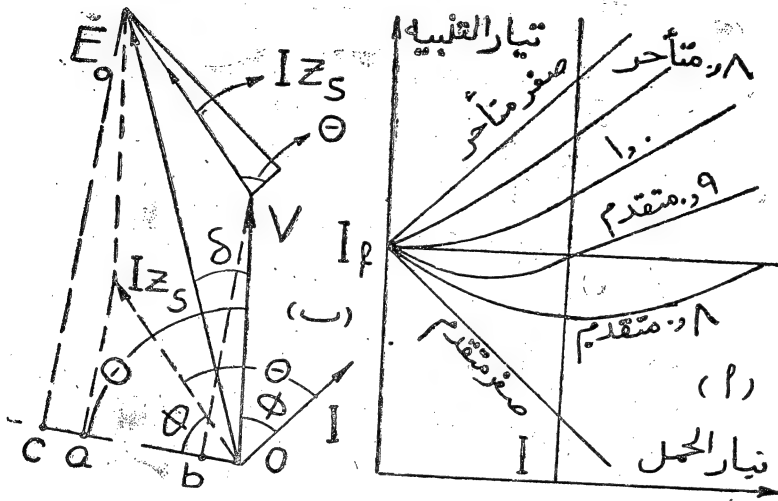
$$C = (R_a^2 + X_s^2) \left(\frac{P}{\cos \phi} \right)^2 = Z_s^2 \left(\frac{P}{\cos \phi} \right)^2$$

$$V = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4C}}{2}} = \sqrt{\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4C}}{2}} \quad (٤-٨)$$

وقد اخترنا القيمة ذات الإشارة الموجبة فقط لأنها تغطي الضغط الأكبر ،
وبالتالي مفقودات نحاسية أقل في ملفات المنتج ،

إذا أردنا الحصول على ضغط طرفي V ثابت القيمة ، يجب تغيير تيار التنبيه ،
لتغيير قيمة E_o ، وذلك تبعاً لتغير قيمة تيار الحمل I ، ومعامل القدرة $\cos \phi$.
ويتضح من شكل (٤-١) ، (٤-٢) أنه عند معامل قدرة الوحدة ، وأى
معامل قدرة متأخر يجب زيادة قيمة تيار التنبيه للحصول على ضغط طرفي ثابت
القيمة ، بينما نحتاج إلى تقليل قيمة تيار التنبيه ، لنفس السبب ، عند معاملات
القدرة المتقدمة ذات القيمة المنخفضة ، وذلك لأن التيار السعوى المار في ملفات
المنتج يقوى المجال المغناطيسى للاقطاب الرئيسية ولا يضعفه . يبين شكل (٤-٣)
(٤) ، المنحنيات التي تربط بين تيار التنبيه وتيار الحمل ، عند قيم مختلفة

لمعامل القدرة ، وذلك للحصول على ضغط طرفي ثابت القيمة .



شكل (٤-٤)

مثال محلول :

a 3-phase, 50 c/s, 3300 V synchronous generator is rated at 520 KVA. It has a leakage reactance and armature resistance drops of 8% and 2% respectively. With the full load rated current circulated in the machine on short circuit, when driven at normal speed, there was an excitation of 2800 ampere turns on each pole of the rotor. The machine gave the following no load magnetisation curve at normal speed

phase e.m.f. :	0	920	1620	2050	2300
AT/pole :	0	2000	4000	6000	10000

i) Draw the saturation curve at full load zero power factor, and hence determine the percentage regulation at full load 0.8 p.f. leading.

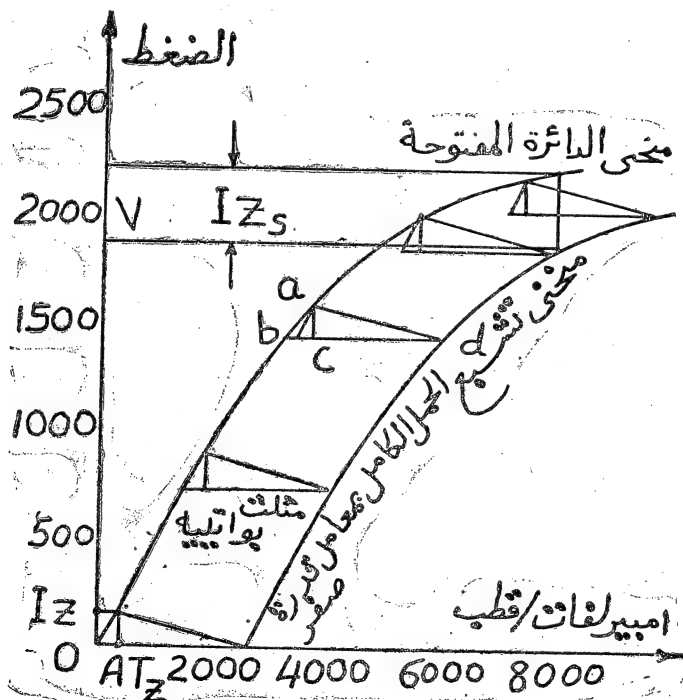
$$IX_1 = 1906 \times 0.08 = 152.4 \text{ V} , \quad IR_s = 38.1 \text{ V} ,$$

$$R_a = 0.42 \text{ ohm}$$

$$IZ = \sqrt{(152.4)^2 + (38.1)^2} = 157.4 \text{ V},$$

$$\mathbf{AT}_z = 357$$

$$AT_A = AT_{fl} - AT_z = 2800 - 350 = 2450 \text{ أمبير لفة/قطب}$$



مسکن (۴ - ۵)

يبين شكل (٥-٤) كيفية رسم منحنى التثبيع عند الحمل الكامل بمعامل قدرة صفر، باستخدام مثلث بوانتييه. لتحديد نقطة مثل d على هذا المنحنى نختار أية نقطة على منحنى الدائرة المفتوحة، ولتكن a . نرسم من a المستقيم ab يوازي الجزء الأول من منحنى الدائرة المفتوحة عند O (الجزء المستقيم من هذا المنحنى)، كما نسقط من a أيضاً العمود ac طوله يساوى IX_s ($152.4V$) ومن c نرسم المستقيم bcd أفقياً، ثم نحدد عليه النقطة d (التي تقع على المنحنى المطلوب)، بحيث يكون bd مساوياً AT_H (2800).

لحساب معامل التنظيم نبدأ أولاً بتعيين معاوقة التزامن عند الحمل الكامل بمعامل قدرة صفر، وذلك بتحديد IZ_s كما هو مبين في شكل (٥-٤).

$$IZ_s = 2240 - 1905 = 335 \text{ V}$$

$$Z_s = \frac{335}{90.85} = 3.69$$

$$X_s = \sqrt{(3.69)^2 - (0.42)^2} = 3.66 \text{ ohms}$$

$$\begin{aligned} E_o &= \sqrt{(V \cos \phi + IR_a)^2 + (V \sin \phi + IX_s)^2} \\ &= \sqrt{(1524 + 38.1)^2 + (1143 + 328)^2} \\ &= 2145 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\varepsilon = \frac{2145 - 1905}{1905} = 0.126 = 12.6 \%$$

بالرجوع إلى منحنى الدائرة المفتوحة نجد أنه عند ضبط التثبيع على 7000 أمبير لفة على كل قطب تصبح قيمة E_o تساوى 2150 V ، وللحصول على الضغط المراد على أطراف المولد نطبق المعادلة (٨-٤) على النحو التالي:

$$P = \frac{340000}{3} = 113250 \text{ W} ,$$

$$Q = P \tan \phi = 85000 \text{ VAR}$$

$$R_a = 0.42 \text{ ohm} , \quad X_a = 3.66 \text{ ohms}$$

$$b = -[4.6 \times 10^6 - 2 (0.113250 \times 0.42 \times 10^6 + 0.085 \\ \times 3.66 \times 10^6)]$$

$$= -[4.6 \times 10^6 - 0.7172 \times 10^6] = -3.8828 \times 10^6$$

$$c = (3.69)^2 \left[\frac{0.11325 \times 10^6}{0.8} \right]^2$$

$$= 13.6 \times 0.02 \times 10^{12} = 0.27 \times 10^{12}$$

$$b^2 = 15 \times 10^{12} , \quad b^2 - 4c = 13.92 \times 10^{12}$$

$$V_t = \frac{\sqrt{3.883 \times 10^6 + \sqrt{13.92 \times 10^{12}}}}{2} = 1950 \text{ V}$$

$$V_L \text{ (terminal voltage)} = 1950 \times \sqrt{3} = 3380 \text{ V الضغط الخطي}$$

علاقات القدرة (Power relations) :

عندما يكون الضغط الطرفي V فولت (الضغط على طرفي الآلة لكل مرحلة ، وهو نفس الضغط المرحلي للحمل) ، وتيار الحمل I أمبير ، وزاوية الاختلاف المرحلي بينهما ϕ ، فإن قدرة المخرج (output power) ، التي تعطى للآلة لكل مرحلة في الحمل ، والتي نرمز لها بالرمز P_o ، تصبح $P_o = VI \cos \phi$ وات .

فإذا كانت E_o هي القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في كل مرحلة من ملفات المنتج ، بفعل الأمبير لفات AT_p على كل قطب ، نجد كما هو مبين في شكل (٤ - ب) أن الزاوية بين E_o و I هي $(\phi + \delta)$ (سبق أن رمزنا لهذه الزاوية بالرمز ψ)

في مخططات المتجهات الخاص بالأمبير افسات) ، وتكون قدرة المدخل الكهربائية
 (Electrical power input) لكل مرحلة هي $P_e = E_o I \cos (\phi + \delta)$
 ويطلق على هذه أيضا اسم قدرة المنتج المرحلية (armature phase power)
 وهي عبارة عن القدرة (لكل مرحلة) التي يحولها المنتج الى قدرة كهربائية ،
 ويأخذها المنتج من عمود الادارة على شكل قدرة ميكانيكية . فاذا أضفنا الى هذه
 القدرة المفقودات الميكانيكية (mechanical losses) ، ومفقودات الحديد
 (iron or core losses) في الآلة ، فاننا نحصل على قدرة المدخل P_i ، التي تأخذها
 الآلة الكهربائية من الآلة الميكانيكية ، على شكل قدرة ميكانيكية ، لتحويلها الى
 قدرة كهربائية P_o في الحمل الكهربى . وبذلك يكون معامل الجودة للآلة الكهربائية

$$\eta = \frac{P_o}{P_i}$$

بتحليل V, E_o في اتجاه I نجد ، بالرجوع الى شكل (٤-٤) أن :

$$\begin{aligned} P_e &= E_o I \cos (\phi + \delta) = I (V \cos \phi + I R_a) \\ &= VI \cos \phi + I^2 R_a \dots \dots \dots (٤-٩) \end{aligned}$$

وهذا يعنى أن جزءا من القدرة الكهربائية P_e ، وهو المعطى بالحد $I^2 R_a$ في
 المعادلة (٤-٩) ، يتبدد على شكل مفقودات نحاسية (قدرة كهربائية) في ملفات
 المنتج ، وتبقى قدرة المخرج $VI \cos \phi$ التي تعطى للحمل الكهربى . هذا وتحدد
 قيمة E_o في المعادلة (٤-٩) على حسب تيار الحمل I ، ومعاوقة التزامن Z_s ، كما
 سبق بيانه في الباب الثالث . ويمكن إيجاد كل من P_e, P_o بدلالة Z_s ، بالرجوع
 الى شكل (٤-٤) ، على النحو التالى :

بعد رسم مخططات المتجهات من V, I, E_o باستخدام Z_s ، كما سبق شرحه في

الباب الثالث، نرسم IZ_s من نقطة الأصل O ، ثم نرسم الخط $Obac$ يصنع الزاوية θ مع V . نسقط من أطراف V و IZ_s و E_o أعمدة على هذا الخط تقابله في b و a و c على الترتيب، كما هو مبين في شكل (٤-١٠)، الذي نتضح بمراجعته الحقائق الآتية:

١ - الزاوية بين I و IZ_s هي θ (حيث $\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_a}$) وبذلك يكون الخط $Obac$ متقدما على IZ_s بالزاوية ϕ .

٢ - يكون مسقط IZ_s على Oc هو Oa ، حيث $Oa = IZ_s \cos \phi$ ولكن $Oa = Oc - ac$ ، كما أن $Ob = ac$ (كل منها مسقط V على Oc) وبناء على هذا كله نجد أن:

$$Oa = Oc - Ob = E_o \cos (\theta - \delta) - V \cos \theta = IZ_s \cos \phi$$

بالضرب في $\frac{V}{Z_s}$ ينتج أن:

$$P_{o1} = VI \cos \phi = \frac{V}{Z_s} [E_o \cos (\theta - \delta) - V \cos \theta] \quad (٤-١٠)$$

ويمكن بطريقة مماثلة اثبات أن:

$$P_{e1} = E_o I \cos (\phi + \delta) = \frac{E_o}{Z_s} [E_o \cos \theta - V \cos (\theta + \delta)] \quad (٤-١٠)$$

ويمكن تعديل هاتين المعادلتين بحيث تطبقان على المحرك المتزامن، على النحو

التالي:

$$P_{e1} = \left(\frac{E_o}{Z_s} \right) [V \cos (\theta - \delta) - E_o \cos \theta]$$

$$P_{o1} = \left(\frac{V}{Z_s} \right) [V \cos \theta - E_o \cos (\theta + \delta)] \quad (٤-١١)$$

وباعتبار أن $\theta = \frac{\pi}{2}$ تقريبا يمكن تقريب هذه المعادلات إلى :

$$P_{o1} \cong \frac{VE_o}{Z_s} \sin \delta \cong V I \cos \phi$$

$$P_{e1} = \frac{E_o V}{Z_s} \sin \delta \cong E_o I \cos \psi \quad \dots \dots \dots (٤-١١')$$

هذا ونظرا لأن الزاوية θ تكون قريبة جدا من $\frac{\pi}{2}$ لأن X_s أكبر كثيرا

من R_a ، فإنه يمكن تبسيط المعادلتين (٤-١٠) ، باعتبار $\theta = \frac{\pi}{2}$ ،

على النحو التالي :

$$P_{e1} \cong \frac{E_o}{Z_s} V \sin \delta = E_o I \cos (\phi + \delta)$$

$$P_{o1} \cong \frac{V}{Z_s} E_o \sin \delta = V I \cos \phi$$

(٤-١٢)

نجد أن $P_{e1} \cong P_{o1}$ في هذه الحالة ، وهذه نتيجة حتمية لإعتبار أن

$\theta = \frac{\pi}{2}$ ، لأن هذا يعنى ضمنا أن $R_a = 0$ ، مما يؤدي إلى اختفاء حد

المفقودات الحرارة التي تنبدد في ملفات المنتج بالقيمة $I^2 R_a$ ، وهي الفرق بين

المعادلتين (٤-١٠) ، (٤-١١) . ويتبين لنا من المعادلة (٤-١٢) أن كلا

من قدرة المدخل الكهربائية P_{e1} ، وقدرة المخرج P_{o1} ، للآلة المتزامنة ، يتناسب

مع جيب الزاوية δ (أو مع الزاوية δ مقدرة بالزوايا نصف القطرية إذا كانت

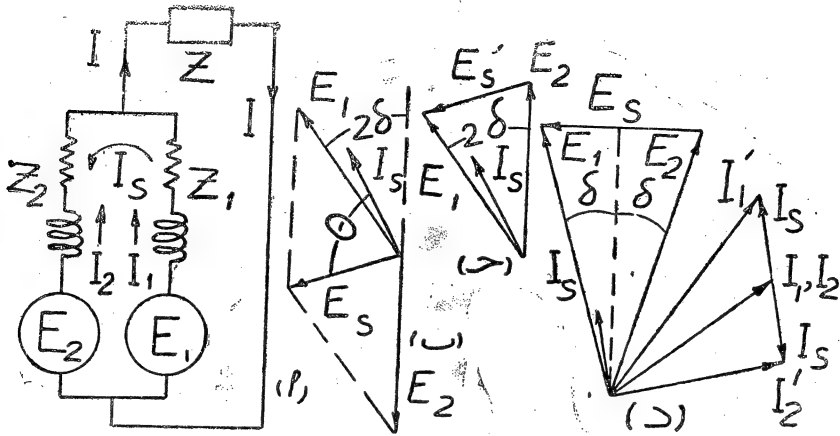
صغيرة) . وهذه الزاوية δ هي التي تحدد مقدار الازاحة التي تحدث لمحاور الفيض المغناطيسى ϕ_0 ، التي تنطبق أصلا مع محاور الاقطاب الرئيسية ، وذلك بفعل الفيض المغناطيسى ϕ_R للمفات المنتج ، حتى تقع في النهاية على محاور الفيض المغناطيسى المحصل ϕ_R . ويطلق على الزاوية δ عادة اسم زاوية الحمل (load angle) ، كما يطلق عليها أيضا اسم زاوية عزم الدوران (torque angle) . ويتضح من المعادلة (١٢ - ٤) أن زيادة قيمة E_0 ، وبالتالي قيمة تيار التنبيه ، يؤدي إلى زيادة قدرة المخرج لكل وحدة من الزاوية δ $\left(\frac{P_0}{\delta} \right)$ ، وهذا يعزز من اتزان الآلة .

ثانيا - تشغيل مولدى التزامن على التوازي على حمل منفصل

(Parallel operation of two synchronous generators on isolated load)

يبين شكل (٦ - ٤ أ) مولدى تزامن متصلين على التوازي ، ويغذيان معا حملا منفصلا يتمثل في المعاوقة Z ، حيث E_1 هي القوة الدافعة الكهربائية المرحلية، المتولدة في ملفات المنتج بفعل الأمبير لفات AT_p الموجودة على كل قطب ، بالنسبة للآلة الاولى ، و E_2 بالنسبة للآلة الثانية، و Z_1 هي معاوقة التزامن للآلة الاولى و Z_2 للآلة الثانية ، و I_1' هو التيار الذى تشارك به الآلة الاولى و I_2' التيار الذى تشارك به الآلة الثانية ، في تيار الحمل الكلى I .

إذا أمكن جعل الآلتين تولدان قوتين دافعتين كهربيتين متساويتين تماما في القيمة ، ومتفقتين معارحياً ، كل منهما تساوى E_0 ، فإننا نحصل على علاقة بسيطة لتقسيم التيار بينهما على النحو التالى :



شكل (٦-٤)

$$\dot{V} = \dot{I} \dot{Z} = \dot{E}_0 - \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = \dot{E}_0 - \dot{I}_2 \dot{Z}_2 \dots\dots\dots (٤-١٣)$$

$$\therefore \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = \dot{I}_2 \dot{Z}_2 \quad , \quad \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I} \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad , \quad \dot{I}_2 = \dot{I} \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad (٤-١٤)$$

تبين المعادلة (٤-١٤) أن الآلتين تنقسمان التيار الكلي I بينهما بنسبة عكسية لمعاورتي التزامن فيها ، وذلك إذا استطعنا الاحتفاظ بالشرط السابق قائماً طول الوقت ، وهو تساوى E_0 عددياً ومرحلياً طول الوقت . هذا وعلى الرغم من أننا لا نستطيع أن ندعى القدرة على الاحتفاظ بهذا الشرط دون خلال طوال وقت تشغيل الآلتين على التوازي ، إلا أننا نستطيع أن نبرهن على أن طبيعة تكوين كل من المولدين تساعد على القضاء آلياً على الآثار التي تترتب على نشوء اختلاف في القوة الدافعة الكهربائية المرحلية في المولدين . ونظراً لأن القدرة التي يساهم بها كل مولد تنوقف على زاوية الحمل δ ، فإن أهم الآثار ، التي تعيننا في

هذا المضمار ، هي تلك التي تترتب على تقدم متجه القوة الدافعة الكهربائية في أحد المولدين على متجه القوة الدافعة الكهربائية في الأخرى ، نتيجة لزيادة في سرعة الأولى ، أو إبطاء في سرعة الثانية .

نفرض أولا أن الآلتين متماثلتان ، وتدوران بدون حمل ، وأن القوتين الدافعتين الكهربيتين E_1 ، E_2 متساويتان في القيمة ، ومتفقتان معاً مرحلياً . هذا يعنى أنه بالنسبة للدائرة الخارجية ، التي يغذيها المولدان ، يكون المتجهان اللذان يمثلان القوتين منطبقين تمام الانطباق . أما بالنسبة للدائرة الداخلية ، المتكونة منهما معاً على التوالي ، فإن هذين المتجهين يكونان متساويين في المقدار ومتضادين في الاتجاه ، بحيث لا ينتج عنهما أى تيار في الدائرة المذكورة . فإذا أسرعت الآلة الأولى قليلاً ، فإن هذا يؤدي إلى تقدم متجه القوة الدافعة الكهربائية فيها ، وهو E_1 ، بالزاوية 2θ ، على متجه القوة الدافعة الكهربائية في الآلة الثانية ، وهو E_2 ، وذلك كما هو مبين في شكل (٦ - ب) ، بالنسبة للدائرة الداخلية بين المولدين ، وفي شكل (٦ - ج) ، بالنسبة للدائرة الخارجية لهما معاً . وينتج عن ذلك وجود قوة دافعة كهربية محصلة E_s تعمل على تمرير التيار I_s في الدائرة الداخلية بين المولدين ، كما هو مبين في شكل (٦ - أ) . وتحتوى هذه الدائرة على معاوكتي التوازن Z_1 و Z_2 متصلتين على التوالي معاً . ولما كانت نسبة ممانعة التوازن X_s ، في كل من المعاوكتين ، عالية جداً بالنسبة للمقاومة R_s فيهما ، فإن الزاوية θ بين E_s و I_s تساوى 90 درجة كهربية تقريباً . وهذا يعنى ، كما يتضح من شكل (٦ - ب ، ج) ، أن التيار I_s يظهر في الدائرة بالنسبة للآلة الأولى كمولد ، وبالنسبة للآلة الثانية كمحرك ، فيكون تأثيره بالإبطاء في سرعة الآلة الأولى ، والزيادة في سرعة الآلة الثانية ، مما يؤدي إلى إعادة توازن الأمور

كما كانت عليه في أول الأمر .

إذا أهملنا المفقودات النحاسية في مقاومة الملفات على منتجى المولدين (بفرض أن $R_a = 0$ ، وهذا يتمشى مع فرضنا أن $\theta \approx \frac{\pi}{2}$) واعتبرنا أن التيار I_s فى توافق مرحلى تقريبا مع كل من E_1 (كمولد) و E_2 (كمحرك) نجد أن القدرة التى يحمل بها المولد ، وتسبب فى إبطاء سرعته ، ونرمز لها بالرمز P_s ، تساوى تقريبا القدرة التى يأخذها المحرك ، وتسبب فى زيادة سرعته ، حيث :

$$P_s \approx E_1 I_s \approx E_2 I_s \dots \dots \dots (١٥-٤)$$

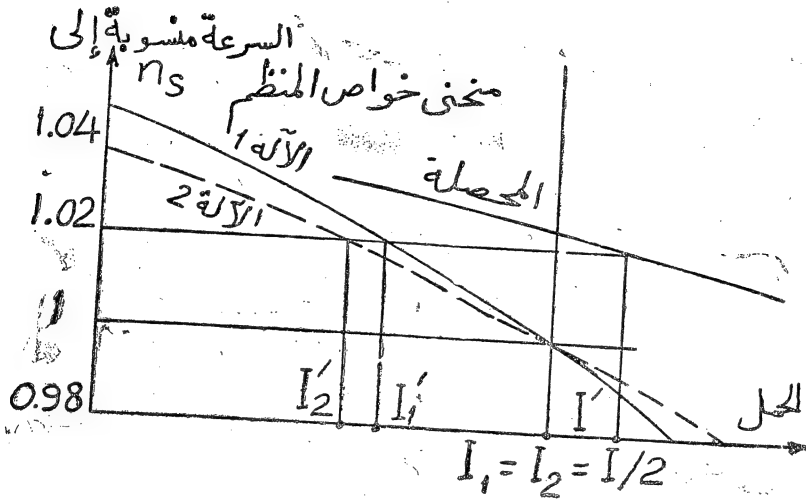
يطلق على P_s اسم قدرة التزامن (synchronising power) ، وهى تمثل القدرة التى تسرى بين منتجى المولدين لإعادتهما إلى حالة التوازن الأصلية ، من حيث دوران كل منهما بسرعة التزامن ، واتفاق متجهى القوة الدافعة الكهربائية فيهما مرحليا بالنسبة للدائرة الخارجية . وتزداد قيمة هذه القدرة آليا بازدياد درجة الخلل فى حالة التوازن الأصلية ، كما يستطيع كل مولد احتمال هذه القدرة فى حدود قيمة النهاية العظمى للقدرة التى يولدها . ويلاحظ أن السبب فى سريان قدرة التزامن بين المولدين ، على هذا النحو ، وبهذه الفاعلية ، يرجع فى الأساس إلى طبيعة تكوين الدائرة الداخلية لكل منهما ، من حيث زيادة قيمة الممانعة الحثية (X_s) ، فى هذه الدائرة ، على قيمة المقاومة (R_a) بدرجة كبيرة ، مما يجعل التيار I_s فى اتفاق مرحلى تقريبا مع كل من E_1 (كمولد) و E_2 (كمحرك) .

تسرى قدرة التزامن ، بنفس الطريقة وتمت نفس الظروف السابق ذكرها ،

عندما يشترك المولدان في تغذية حمل مشترك . وفي هذه الحالة تعمل هذه القدرة على تخفيف الحمل عن الآلة التي ابطأت ، وزيادة الحمل على الآلة الأخرى ، مما يعمل على إعادة توازن كل منهما . يبين شكل (٦ - ٤ د) كيف يزداد الحمل على الآلة الأولى ، بزيادة قيمة التيار فيها من I_1 إلى I'_1 ، وزيادة معامل قدرته في نفس الوقت ، وكيف يقل التيار في الآلة الثانية من I_2 إلى I'_2 ، وينخفض معامل قدرته ، مما يؤدي إلى تقليل نصيبها من الحمل . ويتم التعديل في قيمة التيار ومعامل قدرته في الآتين بفعل تيار التزامن I_3 ، الذي يمر في الدائرة الداخلية بين الآتين ، دون أن يؤثر على تيار الحمل الخارجى I في شيء .

ينطبق التحليل السابق على مولدين متماثلين ، عند ضبط تيار التنبيه على نفس القيمة في كل منهما ($E_1 = E_2$) . ونستطيع عموماً تشغيل مولدين على التوازي معاً ، وذلك على الرغم من اختلافهما في كل شيء ، ابتداءً من معاوقة التزامن والقوة الدافعة الكهربائية في كل منهما ، إلى منحنى تنظيم السرعة الذى يتوقف شكله على ضبط منظم الآلة المحركة (Governor of primemover) . ويؤثر بجرى منحنى خواص المنظم (Governor characteristic) لكل مولد على تقسيم الحمل بين المولدين . ومن المعتاد أن نحصل على الحمل الكامل من كل آلة عند سرعة التزامن ، كما هو مبين في شكل (٧ - ٤) ، بالنسبة لمنحنى خواص المنظم 1 ، 2 ، للآتين 1 ، 2 على التوالي . فإذا اختلفت السرعة عن ذلك ، تغير نصيب كل من الآتين من الحمل ، على حسب بجرى منحنى خواص المنظم لكل منهما ، كما هو مبين على نفس الشكل .

إذا فرضنا أن الآتين تتفقان في بجرى منحنى خواص المنظم ، وأن E_1 لا تساوى E_2 ، وكذلك Z_1 لا تساوى Z_2 ، وأنهما موصلتان على التوازي على



شكل (٧-٤)

نفس الحمل Z الذي يأخذ التيار I عند الضغط V كما هو مبين في شكل (٦-٤)، بحيث يكون التيار الذي تعطيه الآلة الأولى I_1 ، والتيار الذي تعطيه الآلة الثانية I_2 ، وذلك عندما تكون كل منهما دائرة بسرعة التزامن (أى عند عدم وجود أى إخلال في التوازن فيكون $I_2 = 0$)، نجد أن:

$$\dot{V} = \dot{E}_1 - I_1 \dot{Z}_1 = \dot{E}_2 - I_2 \dot{Z}_2 = \dot{I} \dot{Z}$$

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 = I_1 \dot{Z}_1 - I_2 \dot{Z}_2, \quad \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

$$\dot{E}_2 = I_2 \dot{Z}_2 + \dot{I} \dot{Z} = I_2 (\dot{Z}_2 + \dot{Z}) + \dot{I}_1 \dot{Z}$$

$$\dot{E}_1 = I_1 \dot{Z}_1 + \dot{I} \dot{Z} = I_1 (\dot{Z}_1 + \dot{Z}) + \dot{I}_2 \dot{Z}$$

بحل المعادتين السابقتين في I_1 ، I_2 نحصل عليهما كما يأتي:

$$\dot{I}_1 = \frac{(\dot{E}_1 - \dot{E}_2)\dot{Z} + \dot{E}_1\dot{Z}_2}{\dot{Z}(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{Z}_1\dot{Z}_2},$$

$$\dot{I}_2 = \frac{(\dot{E}_2 - \dot{E}_1)\dot{Z} + \dot{E}_2\dot{Z}_1}{\dot{Z}(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{Z}_1\dot{Z}_2}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_1\dot{Z}_2 + \dot{E}_2\dot{Z}_1}{\dot{Z}(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{Z}_1\dot{Z}_2} \dots\dots\dots (\xi-16)$$

$$\dot{V} = \dot{I}\dot{Z} = \frac{\dot{E}_1\dot{Z}_2 + \dot{E}_2\dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + (\dot{Z}_1\dot{Z}_2/\dot{Z})} \dots\dots\dots (\xi-17)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 - \dot{V}}{\dot{Z}_1}, \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2 - \dot{V}}{\dot{Z}_2} \quad (\xi-18)$$

$$\dot{I}_s = \frac{(\dot{E}_1 - \dot{E}_2)}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + (\dot{Z}_1\dot{Z}_2/\dot{Z})} \dots\dots\dots (\xi-19)$$

: مثال حل (1)

Two 3-phase synchronous generators are supplyin a load impedance of $20 + j 10 \Omega$ in parallel. The excitation of each machine is adjusted untill the e.m f. induced per phase is 2200 volts in both. The synchronous impedance of the first machine is $0.4 + j 6.0 \Omega$, and that of the second one is $0.5 + j 8.0 \Omega$. Find the terminal voltage, the current supplied by each machine, its power output, and the circulating current for a phase divergence of 20° (electrical). Calculate the corresponding values, when the e.m.f s are in phasc.

إذا فرضنا أن E_1 تنطبق على المحور المرجعي (reference axis) ، فعنى هذا أن E_2 متأخرة بزاوية مقدارها 20 درجة كهربية ، عندما يحدث الاختلاف المرحلي المنصوص عليه . وفى هذه الحالة نجد أن :

$$\dot{E}_1 = 2200 \quad , \quad \dot{E}_2 = 2200 \angle -20 = 2065 - j 800$$

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 = 135 + j 800 \quad , \quad \dot{E}_2 - \dot{E}_1 = -135 - j 800$$

$$(\dot{E}_1 - \dot{E}_2) \dot{Z} = (135 + j 800) \cdot (20 + j 10)$$

$$= - 5300 + j 17350$$

$$(\dot{E}_2 - \dot{E}_1) \dot{Z} = 5300 - j 17350$$

$$\dot{E}_1 \dot{Z}_2 = 2200 (0.5 + j 8) = 1100 + j 17600$$

$$\dot{E}_2 \dot{Z}_1 = (2065 - j 800) (0.4 + j 6.0) = 5626 + j 12070$$

$$\dot{E}_1 \dot{Z}_2 + \dot{E}_2 \dot{Z}_1 = 6726 + j 29670$$

$$\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 = 0.9 + j 14.0 \quad , \quad \dot{Z}_1 \dot{Z}_2 = - 47.8 + 6.2 j$$

$$\dot{Z} \dot{Z}_1 = - 52 + j 124 \quad , \quad \dot{Z} \dot{Z}_2 = - 70 + j 165$$

$$\frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}} = - 1.785 + j 1.24 \quad ,$$

$$\dot{Z} (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2 = - 169.8 + j 295.2$$

$$\dot{I}_1 = \frac{- 5300 + j 17350 + 1100 + j 17600}{- 169.8 + j 295.2}$$

— 144 —

$$= \frac{-4200 + j 34950}{-169.8 + j 295.2}$$

$$= \frac{11112000 - j 4684000}{115700} = 95.95 - j 40.5$$

$$= 104.25 \angle -23^\circ$$

$$\dot{I}_2 = \frac{5300 - j 17350 + 5626 + j 12070}{-169.8 + j 295.2}$$

$$= \frac{10926 - j 5280}{-169.8 + j 295.2}$$

$$= \frac{-3412000 - j 2324000}{115700} = -29.5 - j 20.1$$

$$= 35.7 \angle -145.6^\circ$$

$$\dot{I} = 66.45 - j 60.6 = 90 \angle -42.5^\circ$$

$$\dot{V} = (66.45 - j 60.6) (20 + j 10) = 1929.6 - j 535.5$$

$$= 1997 \angle -15.5^\circ$$

$$P_1 = 3V I_1 \cos 7.5 = 3 \times 1997 \times 104.25 \times 0.9914$$

$$= 618500 \text{ W}$$

$$P_2 = 3V I_2 \cos 130.1 = 3 \times 1997 \times 35.7 \times -0.6428$$

$$= -137200 \text{ W}$$

$$P = 3VI \cos 27 = 3 \times 1997 \times 90 \times 0.819$$

$$= 481300 \text{ W}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{135 + j 800}{0.9 + j 14.0 - 1.785 + j 1.24}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{135 + j 800}{- 0.685 + j 16.24} \\
 &= \frac{12297.4 - j 2606}{232.5} = 52.8 - j 11.22 \\
 &= 54 \angle -12^\circ
 \end{aligned}$$

المعنى الذى تعبر عنه القدرة السالبة P_2 ، للآلة الثانية ، أنها أصبحت تعمل كمحرك ، نتيجة للاختلاف المرحلى بين القوة الدافعة الكهربائية التى تولدها ، والقوة الدافعة الكهربائية التى تولدها الآلة الأولى (E_2 متأخرة عن E_1 بزاوية مقدارها 20 درجة كهربية) . لذلك أصبح لزاما على الآلة الأولى ، التى تعمل كمولد ، أن تغذى الحمل بالقدرة P ، ومقدارها 481300 W ، وتغذى الآلة الثانية كمحرك بالقدرة P_2 ، ومقدارها 137200 W ، فتصبح قدرتها 618500 W . هذا ويؤدى حدوث الاختلاف المرحلى بين القوتين الدافعتين فى الآلتين إلى نشوء قدرة تزامن تعمل على إعادة الأمور إلى نصابها الصحيح ، كما سبق شرحه ، فتنتج الآلة الأولى قدرة التزامن P_{s1} ، التى تعمل على إبطاء سرعتها (كمولد) ، وتأخذ الآلة الثانية قدرة التزامن P_{s2} ، التى تعمل على زيادة سرعتها (كمحرك) ، حيث :

$$\begin{aligned}
 P_{s1} &= 3 E_1 I_s \cos \phi (E_1, I_s) \\
 &= 3 \times 2200 \times 54 \cos 12^\circ = 348000 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$P_{s2} = 3 E_2 I_s \cos \phi (E_2, I_s) = 354000 \text{ W}$$

عندما تكون E_1 فى اتفاق مرحلى مع E_2 (وهى حالة التشغيل المعتادة عند عدم وجود أية متاعب أو أخطاء) يصبح $E_2 - E_1 = 0$ ، ونحصل على التيارات بأخذ ذلك فى الاعتبار بالنسبة للمعادلات من (١٦ - ٤) إلى (١٩ - ٤) ،

فوجد أن :

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{1100 + j 17600}{-169.8 + j 295.2} = \frac{4998800 - j 3304000}{115700} \\ &= 43.15 - j 28.55 = 51.75 \angle -33.5^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{880 + j 13200}{-169.8 + j 295.2} = \frac{3740700 - j 2494500}{115700} \\ &= 32.3 - j 21.5 = 38.7 \angle -34^\circ \end{aligned}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 75.45 - j 50.05 = 90.5 \angle -34^\circ$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{I} \dot{Z} = (75.45 - j 50.05) (20 + j 10) \\ &= 2009 - j 246.5 \\ &= 2020 \angle -70^\circ \end{aligned}$$

$$P_1 = 3 \times 2020 \times 51.75 \cos 26.5 = 280000 \text{ W}$$

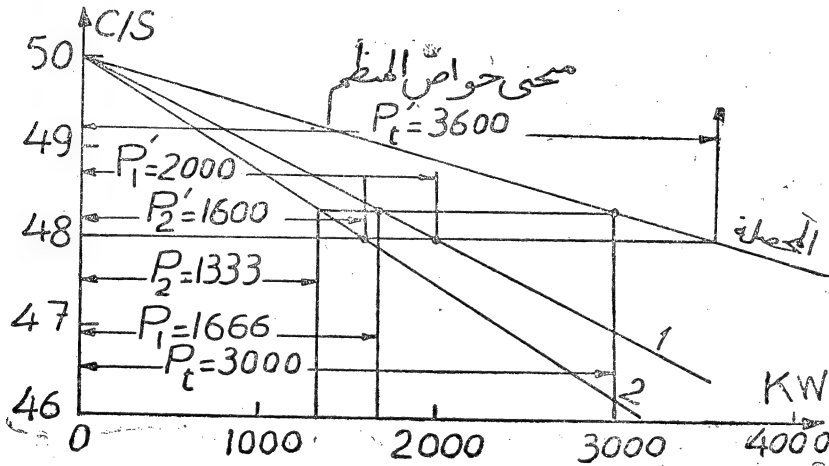
$$P_2 = 3 \times 2020 \times 38.8 \cos 27 = 209000 \text{ W}$$

$$P = 3 \times 2020 \times 90.5 \cos 27 = 487000 \text{ W}$$

مثال ٤٧ (٢) :

Two identical 2000 KVA alternators operate in parallel. The governor of the first machine is such that the frequency drops uniformly from 50 cycles on no load to 48 cycles on full load. The corresponding uniform speed drop of the second machine is 50 to 47.5 cycles. (a) How will the two machines share a load of 3000 Kw ? (b) What is the maximum load at unity power factor that can be delivered without over-loading either machine ?

نرسم منحنى خواص المنظم لكل آلة ، الذى هو عبارة عن خط مستقيم فى هذه الحالة . ويتحدد الخط الأول ، للآلة الأولى بالنقطتين $(50,0)$ ، $(48,2000)$ كما يتحدد الخط الثانى ، للآلة الثانية بالنقطتين $(50,0)$ ، $(47.5,2000)$ ، ثم نجمع الاحداثيين الافقيين لـ P_1 و P_2 عند تردد معين ، للحصول على نقطة على المنحنى المحصل عند نفس التردد ، كما هو مبين فى شكل (٨-٤) . لإيجاد توزيع الحمل الكلى البالغ 3000 KW نعين النقطة المناظرة لهذا الحمل على المنحنى



شكل (٨-٤)

المحصل ، ثم نرسم خطاً أفقياً لتحديد الحمل على كل آلة ، كما هو مبين فى شكل (٨-٤) . يلاحظ أن الآلة الأولى تأخذ حملاً أكبر من الآلة الثانية دائماً ، لأن معدل هبوط التردد فيها مع الحمل أقل من الثانية . فلكي نوزع الحمل 3600 KW على الآلتين ، دون تعدى الحمل على أحدهما عن الحمل الكامل ، يراعى أن تأخذ الآلة الأولى 2000 KW فقط ، كحد أقصى للحمل عليها ، ثم يحدد الحمل على الآلة الثانية بنفس الطريقة السابقة ، ونجد أنه يبلغ 1600 KW فى هذه الحالة .
أنظر شكل (٨-٤) ،

ثالثاً - آلات المتزامنة على قضبان لا نهائية

The synchronous machine on infinite bus-bars

(Infinite bus-bars) : القضبان اللانهائية

بدأت عملية توليد القدرة الكهربائية (generation of electric power) على نطاق ضيق ، باستخدام وحدات صغيرة ، تتكون كل منها من مولد كهربائي محدود القدرة ، يدور بوساطة آلة حرارية ، وهي التي تحول الوقود إلى طاقة ميكانيكية تعطى للمولد على عمود الإدارة ، لكي يحولها بدوره إلى طاقة كهربائية . وقد كان تقنين هذه الوحدات يتم على أساس حمل معين ، كإدارة منطقة صغيرة ، أو تغذية عدد من المحركات الكهربائية ، إلى غير ذلك من المهام المحدودة ، التي تنفذ في نطاق ضيق .

ومع ازدياد استخدام القدرة الكهربائية في الأغراض الصناعية ، والاستخدامات المنزلية والعامة ، بدأت تزداد حجوم وحدات التوليد ، ثم تطور الأمر إلى تركيز توليد القدرة الكهربائية في محطات كبيرة ، ونقل هذه القدرة وتوزيعها في مناطق استخدامها ، إذ وجد أن ذلك يكون أكثر كفاءة وينتج الطاقة الكهربائية بسعر أقل . كما أن استخدام القدرة الهيدروليكية من مساقط توليد المياه ، كقوة محركة للمولدات ، فرض علينا توليد القدرة الكهربائية على نطاق كبير جداً عند هذه المساقط ، ثم نقل هذه القدرة ، وتوزيعها بعد ذلك .

ونظراً لزيادة الاحمال بدرجة كبيرة على بعض المحطات الكبيرة ، بما يزيد عن سعتها ، في بعض الأوقات ، في الوقت الذي تكون فيه الاحمال ، على محطات أخرى كبيرة أيضاً ، أقل من سعتها بكثير ، فقد نشأت فكرة عمل الترابط بين

الكبيره (Interconnection between stations) ، لكي يمكن توزيع الاحمال الزائدة عليها جميعاً ، بحيث لا يتعدى الحمل ، في أى وقت ، على أى منها ، حملها الكامل . بذلك يصبح عندنا في النهاية شبكة واحدة مترابطة من المحطات الكبيرة ، تتمثل في قضبان عمومية ، تتصل بها وتغذيها جميع وحدات التوليد في جميع المحطات . ويكون مقنن قدرة هذه القضبان كبيراً جداً ، ويساوى مجموع مقنن قدرات الوحدات في جميع المحطات ، بحيث تتضاءل قدرة أية وحدة من هذه الوحدات بالنسبة إلى قيمة القدرة الهائلة المتجمعة على تلك القضبان . مثل هذه القضبان العمومية تسمى القضبان اللانهائية . ويلاحظ أنه ، بناء على صغر قيمة قدرة الوحدة الواحدة ، بالنسبة لقيمة القدرة المتجمعة على القضبان اللانهائية ، فإن توصيل هذه الوحدة ، أو فصلها عن القضبان ، لا يمكن أن يؤثر ، بأية حال من الأحوال ، في قيمة ضغط هذه القضبان وتردداتها . هذا إلى جانب وجود أدوات وأجهزة تعمل أيضاً على حفظ الضغط والتردد ثابتين لهذه القضبان . لذلك يطلق على القضبان اللانهائية أيضاً اسم القضبان ذات الضغط والتردد الثابتين (constant voltage constant frequency bus-bars)

ويختلف سلوك الآلة المتزامنة ، وخواص تشغيلها ، عندما تساعد في تغذية الحمل ، بتوصيلها على قضبان لانهائية ، حيث تصبح بذلك متصلة على التوازي مع جميع مولدات الوحدات الأخرى الموصلة على هذه القضبان ، اختلافاً تاماً عن سلوكها ، وخواص تشغيلها ، عندما تعمل على حمل منفصل ، أو تتصل على التوازي مع آلة أخرى لتغذية حمل منفصل . وينشأ هذا الاختلاف من النواحي الآتية :

أولاً — يمكن تغيير الضغط المرحلي على أطراف الآلة ، وتغيير تيار الحمل كذلك ، بتغيير تيار تنميه الآلة (مما يؤدي إلى تغيير القوة الدافعة الكهربائية المتولدة

فيها E) ، إذا كانت الآلة تغذى حملا منفصلا ، بينما لا يمكن تغيير الضغط المرحلي على أطراف الآلة ، المتصلة بالقضبان اللانهاية ، لأن ضغط هذه القضبان لا يتأثر بأية تغييرات تحدث في الآلة ، كما أن هناك إلى جانب ذلك ما يعمل على حفظه ثابتاً ، كما سبق شرحه . هذا ويؤدي تغيير تيار التنبيه ، في الآلة المتصلة بالقضبان اللانهاية ، إلى عمل تغييرات أخرى بالنسبة لخواص تشغيل الآلة ، كما سيأتي ذكره فيما بعد .

ثانياً — يتحدد معامل القدرة في الآلة التي تعمل على حمل منفصل بناءً على نوع هذا الحمل ، من حيث نسبة الممانعة الحثية أو السعوية فيه إلى المقاومة ، بينما يمكن ضبط معامل القدرة على قيمة معينة ، في حالة الآلة المتصلة بالقضبان اللانهاية ، عن طريق تغيير تيار التنبيه ، كما سوف يتضح فيما بعد .

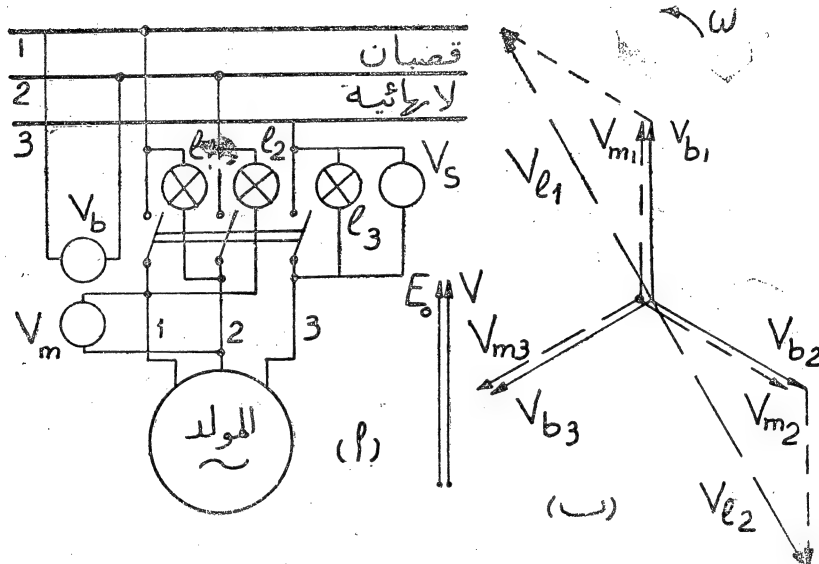
ثالثاً — يمكننا بدء تشغيل الآلة التي تغذى حملا منفصلا ، وهي موصلة إلى هذا الحمل ، دون اتخاذ احتياطات معينة ، بينما يستدعي الأمر ، بالنسبة للآلة التي يراد توصيلها إلى قضبان لانهاية ، أن تمر الآلة بعملية معينة ، يطلق عليها اسم عملية التزامن (Synchronization) ، تنفذ بكل دقة ، وتستنفذ بمجهوداً ووقتاً ، وذلك قبل توصيل الآلة إلى القضبان .

عملية التزامن (Synchronization) :

يجب قبل توصيل الآلة المتزامنة إلى القضبان اللانهاية توافر الشروط الاتية :

١ — أن يكون الضغط المرحلي عند أطراف الآلة مساوياً للضغط المرحلي للقضبان اللانهاية . وحيث أن الآلة لا يمر فيها تيار في هذه الحالة ، فمعي هذا

أن القوة الدافعة الكهربائية المرحلية E_0 ، المتولدة في الآلة بفعل الأمبير لفات AT_p على كل قطب من الأقطاب، يجب أن تساوى في القيمة وتنفق مرحلياً مع V ، كما هو مبين في شكل (٩-٤).



شكل (٩-٤)

٢ — أن تكون قيمة تردد الآلة $\frac{pn_s}{60}$ ، عندما تدور بسرعة التزامن n_s

لغة في الدقيقة، مساوية لتردد القضبان اللانهاية الثابت f ، أي أن $f = \frac{pn_s}{60}$. وهذا يعني أن تثبت الآلة على الدوران بسرعة التزامن n_s ولا تحيد عنها.

٣ — أن يكون توصيل أطراف الآلة إلى القضبان بالتعاقب المرحلي المضبوط، بمعنى أن طرف المرحلة الأولى في الآلة يوصل إلى القضيب الذي تتصل به أطراف المراحل الأولى في مولدات الوحدات الأخرى، وهكذا. ويقال في هذه الحالة

إن التعاقب المرحلي للآلة يماثل التعاقب المرحلي للفضبان (The machine has the same phase sequence as the bus — bars) ويطلق على العملية ، التي يتم فيها تحضير الآلة بحيث تتوافر لها هذه الشروط ، اسم عملية التزامن . وتبدأ عملية التزامن بأعداد الآلة الحرارية نفسها ، وإدارتها لكي تدير المولد ، ثم ضبط الضغط والسرعة ، والمراجعة على صحة التعاقب المرحلي ، قبل قفل مفتاح التزامن ، الذي يصل الآلة بالفضبان الانهائية . ويتم تنفيذ عملية التزامن بمساعدة أجهزة ، توصل بين الآلة والفضبان للانهاية ، كما هو مبين في شكل (٩-٤) ، ويستدل منها على مدى توافر الشروط المطلوبة .

يبين شكل (٩-٤ أ) كيفية إجراء عملية التزامن بطريقة يطلق عليها عادة اسم طريقة المصابيح المضيئة (Bright lamp method) . توصل المصابيح الثلاثة I_1 ، I_2 ، I_3 عبر مفتاح التزامن ، بين الفضبان الانهائية وبين الآلة ، بحيث يوصل المصباح I_1 بين القضيبي رقم 1 وطرف الآلة رقم 2 ، ويوصل المصباح الثاني I_2 بين القضيبي رقم 2 وطرف الآلة رقم 1 ، ثم يوصل المصباح الثالث I_3 بين القضيبي رقم 3 وطرف الآلة رقم 3 . ويقال في هذه الحالة إن المصباحين الأولين موصلان بين الفضبان والآلة توصيلاً متقاطعاً (cross connected) ، بينما يوصل المصباح الثالث بينهما توصيلاً مباشراً (direct connected) . يبين الفولتير V_b الضغط الخطي للفضبان ، بينما يبين V_m الضغط الخطي للآلة ، كما يبين الفرق بين هذين الضغطين . وعندما تكون قراءة V_b تساوى قراءة V_m يتأكد لدينا أن ضغط الفضبان يساوى ضغط الآلة ، وفي هذه الحالة تكون قراءة V_s تساوى صفراً . وتبدأ عملية التزامن بضبط قراءات الفولتيرات الثلاثة على هذا النحو ، عن طريق تغيير تيار التنبيه في الآلة ، مع ضبط سرعة دوران المولد عند سرعة التزامن ، على قدر

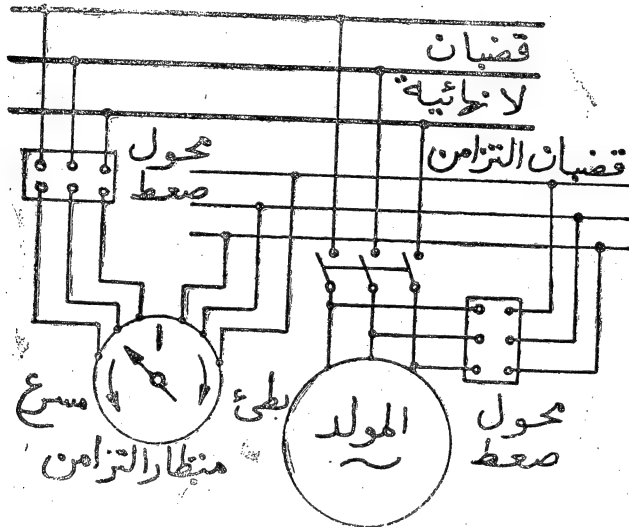
الإمكان . وفي أثناء ذلك يحدث للمصابيح أحد أمرين : ١ - أن تضيء جميعها بطريقة غير منتظمة (Brighten and darken in irregular succession)
 أو ٢ - أن تضيء وتنطفئ بالتتابع بطريقة دورية منتظمة (Brighten and darken in regular succession)
 ففي الحالة الأولى يكون التعاقب المرحلي للمولد مختلفا عن التعاقب المرحلي للقضبان ، ويلزم لذلك تبديل توصيل أى طرفين من أطراف المولد الثلاثة على مفتاح التزامن ، لكي يصبح التعاقب المرحلي للمولد تماثلا للتعاقب المرحلي للقضبان . أما الحالة الثانية فتعني أن التعاقب المرحلي متماثل على الناحيتين ، كل ما في الأمر أن سرعة التزامن ، وبالتالي تردد الآلة ، لم يصل إلى الحد المضبوط بعد ، ويلزم لذلك تقليل السرعة ، أو زيادتها ، على حسب اللزوم ، لكي نصل بقيمة تردد الآلة إلى الحد الذي يساوى فيه تردد القضبان بالضبط . وسوف يتبين لنا من دورية تعاقب إضاءة المصابيح ، واطلامها ، هل الآلة أسرع ، أو أبطأ من اللازم . فيكون تعاقب الإضاءة في الحالة الأولى بترتيب معين للمصابيح ، وفي الحالة الثانية بالترتيب المضاد . وعندما يستقر الوضع على أن يصبح كل من المصباحين I_1 ، I_2 مضيئا بنفس الدرجة (المعتمدة لإضاءته) ، والمصباح I_3 مظلم ، يتأكد لنا أن تردد الآلة قد انضبط ، مع تماثل التعاقب المرحلي على الناحيتين . وباعتبار أننا نكون محافطين طوال الوقت ، عن طريق تغيير تيار التنبيه ، على تساوى ضغط الآلة مع ضغط القضبان ، تكون عملية التزامن قد تمت . ونستطيع حينئذ نقل مفتاح التزامن S ، لكي تصبح الآلة موصلة على القضبان اللانهاية ، دون أن يكون مارأفها أى تيار ، وبحيث تكون القوة الدافعة الكهربائية المرحلية E المتولدة فيها مساوية في القيمة ، ومنتزة مرحليا ، مع ضغط القضبان المرحلي V . ويقال حينئذ إن الآلة قد أصبحت عائمة (floating) على القضبان ، فهي لا تأخذ منها ، ولا تعطى شيئا . وسوف نرى

بعد ذلك كيف يمكننا تشغيل الآلة كولد ، يأخذ قدرة ميكانيكية على عمود الإدارة ، ويحولها إلى قدرة كهربية يعطيها للقضبان ، أو تشغيلها كمحرك ، يأخذ قدرة كهربية من القضبان (المفروض أن قدرتها لانهاية بسبب الترابط بين المحطات ، كما صبق شرحه) ، ويحولها إلى قدرة ميكانيكية يعطيها على عمود الإدارة .

يبين شكل (٩-٤) الضغوط الموجودة على المصابيح الثلاثة ، عندما تكون السرعة مضبوطة ، والضغوط متساوية ، والتعاقب المرحلي متتال على الناحيتين ، حيث تنطبق متجهات ضغوط القضبان المرحلية V_{b1} و V_{b2} و V_{b3} ، على ضغوط الآلة المرحلية V_{m1} و V_{m2} و V_{m3} ، تمام الانطباق . وفي هذه الحالة نجد أن الضغط V_{11} على المصباح I_1 يساوى الضغط V_{12} على المصباح I_2 ، وكلا منها يساوى الضغط الخطي ، بينما يكون الضغط على المصباح I_3 يساوى صفراً . وهذا يفسر اطمئناننا إلى صحة الأوضاع تماماً ، عندما يضيء المصباحان الأولان بنفس الشدة ، ويظلم المصباح الثالث اظلاماً تاماً . وفي الواقع أننا سوف نجد من العسير جداً ضبط الأمور ، ثم بقائها ، على هذا النحو ، وأن أقصى ما نستطيع التوصل إليه أن تأخذ المصابيح الثلاثة في الاضاءة والاظلام ، في تعاقب دوري منتظم ، يكون من البطء ، بحيث يعطينا الفرصة الكافية ، لقفل المفتاح S ، في الفترة الوجيزة التي تمر على المصابيح وهي في الحالة المناسبة المشار إليها .

يبين شكل (١٠-٤) كيف يستخدم جهاز يسمى منظار التزامن (synchroscope) للمساعدة في عملية التزامن ، وزيادة الثبوت من توافر الشروط المطلوبة . وفي مثل هذه الأحوال يتم اجراء عملية التزامن ، في المعتاد ، أولاً على قضبان تزامن (synchronizing bus - bars) ، حتى تتفادى حدوث أية اضطرابات في الشبكة الكهربائية ، نتيجة لإرتكاب أي خطأ في خلال العملية .

ويمكن حينئذ استخدام أجهزة آلية تمنع توصيل مفتاح التزامن ، ما لم تكن الشروط اللازمة متوافرة تماما . ويتكون منظار التزامن ، بكل بساطة ، من ثلاث ريشات من الحديد ، موجودة على محور واحد ، يفصل بين كل اثنتين منها زاوية مقدارها



شكل (١٠ - ٤)

120 درجة . وهى معرضة لتأثير المجال المغناطيسى المحصل ، الذى ينشأ نتيجة لوجود المجال المغناطيسى الدائر بفعل ضغط القضبان ، مع المجال المغناطيسى الدائر بفعل ضغط الآلة . لذلك يدور مؤشر المنظار فى إتجاه المجال الأسرع ، بحيث يمكن معرفة هل الآلة مسرعة أو مبطئة عن الحد اللازم . ويتحدد ذلك بناء على دوران المؤشر ، فى أى من الاتجاهين المتضادين ، بالنسبة لعلامة واضحة ، يكون وقوف المؤشر عندها دليلا على استقرار الأمور على الوضع الصحيح .

ضبط قيمة التيار ومعامل القدرة لآلة عندما تعمل كمولد :

بعد أن يتم توصيل الآلة إلى القضبان اللانهائية ، وتصبح عائمة عليها

($\dot{E}_0 = \dot{V}$) ، يمكن تشغيلها كمحرك ، أو كمولد ، كما سبق ذكره . ونبين فيما يلي بالتفصيل كيف يتم تغيير قيمة تيار الحمل ، الذى يسرى من الآلة إلى القضبان عندما تعمل كمولد ، أو يسرى من القضبان إلى الآلة عندما تعمل كمحرك ، وزاوية اختلافه المرحلى مع الضغط V ، أو معامل قدرته بمعنى آخر ، فى كلتا الحالتين . وسوف نعلم فى تحليلاتنا القادمة على حقيقتين أساسيتين ، سبق استيعابهما ، بالنسبة للآلة المتزامنة . الحقيقة الأولى تتعلق بالمعادلة التى تربط بين القوة الدافعة الكهربائية المتولدة فى الآلة \dot{E}_0 ، والضغط الطرفى \dot{V} ، وتيار الحمل \dot{I} ومعاوقة الترامن Z_s ، التى تعتبر ثابتة ، كما توجد فى مخطط المتجهات ، حيث :

$$\dot{E}_0 = \dot{V} + \dot{I} Z_s \quad \dots\dots\dots (٢٠-٤)$$

والحقيقة الثانية تتعلق بالمعادلة (١١-٣) ، التى تعطى قيمة القوة الدافعة الكهربائية E_0 ، وتقرر أنها تتناسب تناسباً طردياً مع كل من سرعة التزامن n_s ، والفيض المغناطيسى الكلى Φ ، الناتج عن الأمبير لفات على كل قطب رئيسى .

AT_p

بوضع هاتين الحقيقتين نصب أعيننا نستنتج أن تعديل التيار \dot{I} ، فى القيمة وزاوية الاختلاف المرحلى ($\dot{I} = I \angle \phi$) ، لا يمكن أن يتم ، بالنسبة للآلة المتزامنة العائمة على القضبان اللانهاية ، إلا بتعديل \dot{E}_0 (قيمة وإتجاهها) ، وبالتالي تعديل كل من n_s و ϕ ، لأن كل من \dot{V} و Z_s ثابت القيمة والاتجاه .

أولاً : بالنسبة لتعديل n_s ، نجد أن هذا لا يتمشى مع طبيعة الآلة المتزامنة ،

حيث أن من أهم خصائصها ثبوت سرعة التزامن ، بما يتناسب مع ثبوت تردد القضبان الموصلة إليهما $(f = \frac{pn_s}{60})$. ولكن يمكننا مع ذلك الأخذ بمبدأ تغيير السرعة في فترات تلاشي (transient periods) ، تتعرض لها الآلة وقت التغيير (لحظات قصيرة جداً) ، ثم تعود إلى نصابها الصحيح ، من حيث ثبوت سرعة التزامن عند قيمتها الأصلية ، في حالتها المستمرة (steady state) . وفي حالة الرغبة في تغيير السرعة ، عندما تكون الآلة عاملة كمولد ، فإن الوسيلة الوحيدة لذلك تكون عن طريق تغيير عزم الدوران المحرك للآلة ، وذلك بضبط المنظم (Governor) في الآلة الحرارية ، أو للتوربينة (تغيير استهلاك الوقود أو دخول البخار أو الماء للتوربينة) . وفي هذه الحالة تتغير سرعة الآلة لحظياً ، بسبب اختلال التوازن بين عزم الدوران المحرك على عمود الإدارة ، وعزم الدوران المضاد الناشئ عن رد فعل المنتج ، الممثل في المجال المغناطيسي الدائر . ويؤدي ذلك في النهاية إلى اختلاف في قيمة الزاوية δ التي سبق أن بينا أنها تتوقف على مقدار الحمل الموجود . وهذا كله يعني أننا نستطيع أن نستعير عن تغيير السرعة ، للتأثير على E_0 ، بتغيير ضبط المنظم في الآلة الحرارية التي تدير المولد ، بحيث ينتج عن ذلك تغيير في قيمة القدرة الفعالة (active power) التي تعطى للقضبان الرئيسية عن طريق المولد . وفي هذه الحالة ينشأ تغيير أساسي في قيمة الزاوية δ بالذات .

أما في حالة الرغبة في تغيير السرعة ، للتأثير على E_0 ، عندما تكون الآلة عاملة كمحرك ، فإن الأوضاع المناظرة لحالة المولد تستدعي منا ، في هذه الحالة ، تغيير الحمل الميكانيكي على عمود الإدارة ، لإيجاد الاختلال اللازم بين عزم الدوران المحرك ، الذي يتركز في المجال المغناطيسي الدائر ، وعزم الدوران

المضاد للحمل ، بحيث ينشأ تغيير لحظى في السرعة ، يؤدي إلى حدوث التغيير المطلوب في قيمة الزاوية δ . ثم تستقر الأمور بعد إنقضاء فترة الثلاثى ، التى حدث فى خلالها تغيير الحمل ، بحيث تكون القدرة الفعالة (active power) التى يأخذها المحرك من القضبان اللانهاية فى حالة الإستمرار (steady state) الجديدة ، قد تغيرت عن ذى قبل ، وأصبحت مقابلة للحمل الميكانيكى الجديد .

ثانيا : بالنسبة لتعديل ϕ ، ويكون ذلك بتعديل قيمة AT_p ، عن طريق تغيير تيار التنبيه فى الآلة ، نجد أن القدرة الفعالة ، التى يعطيها المواد للقضبان ، أو يأخذها المحرك من القضبان ، لادخل لها بهذا التيار (اللهم إلا من ناحية تغير قيمة القدرة التى تتبدد على شكل حرارة فى ملفات الأقطاب ، بسبب مرور تيار التنبيه فيها ، وهى نسبة ضئيلة جداً من قدرة الآلة ، بحيث لا يلتفت إليها فى هذا المجال ، ومن ثم فلا يوجد ما يبرر الإعتقاد بأن له تأثيراً عليها) . ولكن إذا استمرضنا تأثير رد فعل المنتج ، كما سبق شرحه ، على قيمة الفيض ϕ ، نجد أنها تتأثر أساساً بفعل مركبة التيار غير الفعالة (التى تقف عليها قيمة AT_p) ، التى تعطى فيضاً مغناطيسياً مباشراً ، يطرح من ϕ . إذا كانت مركبة التيار حثية (inductive) ، ويجمع مع ϕ . إذا كانت مركبة التيار سعوية (capacitive) . وهذا يعنى أن تغيير تنبيه الآلة (change of excitation) يؤدي إلى تغيير قيمة مركبة التيار غير الفعالة ، وبالتالي قيمة القدرة غير الفعالة ، التى تعطيها الآلة للقضبان ، عندما تعمل كمولد ، أو تأخذها من القضبان ، عندما تعمل كمحرك . وهذا يحمل فى طياته تغييراً أساسياً فى زاوية الاختلاف المرحلى ϕ بين الضغط V والتيار I ، وبالتالى معامل القدرة الذى تعمل عنده الآلة . هذا ويمكن تلخيص كل ما سبق فى حقيقتين هامتين ، وهما خاصيتين بتشغيل الآلة المتزامنة على

القضبان اللانهاية ، سواء كمولد ، أو كمحرك :

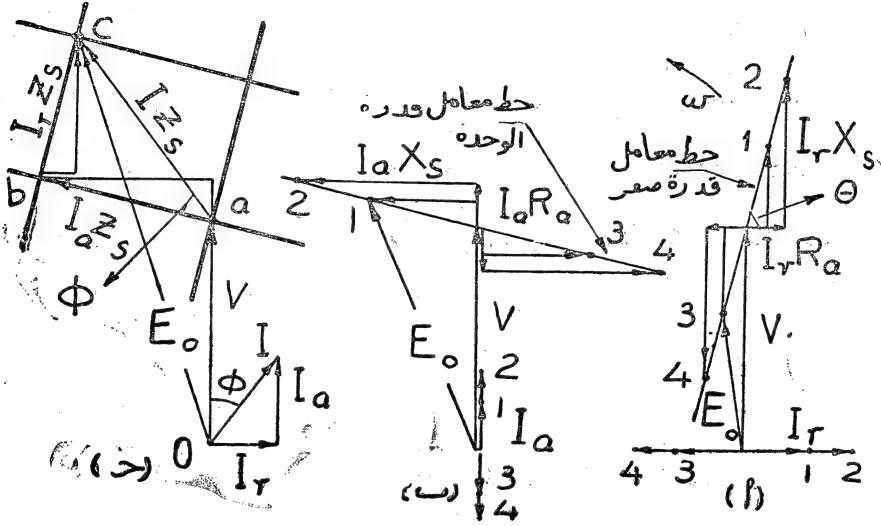
١ - إن تغيير ضبط منظم الآلة الحرارية (adjustment of governor) setting في حالة المولد ، وتغيير الحمل الميكانيكى على عمود إدارة المحرك ، لا يحدث أى تغيير في القدرة غير الفعالة (reactive power) ، وإنما يؤدى إلى تغيير القدرة الفعالة (active power) ، التى يعطيها المولد للقضبان ، أو يأخذها المحرك من هذه القضبان . هذا ويستتبع تغيير القدرة للفعالة تغييراً في مركبة التيار الفعالة ، نظراً لأن الضغط V ثابت القيمة .

٢ - إن تغيير تيار التنبيه للآلة ، أو تنبيه الآلة باختصار ، لا دخل له بالقدرة الفعالة التى يعطيها المولد للقضبان ، أو بالحمل الميكانيكى على عمود إدارة المحرك ، وإنما يعمل على تغيير القدرة غير الفعالة (reactive power) ، التى تسرى من المولد إلى القضبان ، أو يأخذها المحرك من القضبان . هذا ويستتبع تغيير القدرة غير الفعالة تغييراً في مركبة التيار غير الفعالة ، لأن الضغط V ثابت القيمة .

وفي كلتا الحالتين يحدث تغيير في معامل القدرة ، أو بمعنى آخر تغيير في زاوية الاختلاف المرحلى بين الضغط والتيار . ولكن نظراً لأن لمركبة التيار غير الفعالة تأثيراً مباشراً (مضاد أو مع) الفيض المغناطيسى الكلى Φ ، الذى تتوقف عليه قيمة E_0 ، نجد أن تغيير التنبيه أبعد أثراً على معامل القدرة من تغيير ضبط وضع المنظم .

يبين شكل (١١ - ٤) كيف تتأثر E_0 (قيمة واتجاها) بتغيير كل من I_p ، التيار غير الفعال ، و I_a التيار الفعال ، في الآلة . ففى (أ) نجد أن تغيير التيار

غير الفعال ، عندما يكون التيار الفعال ، وبالتالي القدرة الفعالة ، مساويا للصفر ،



شكل (١١-٤)

يؤدي إلى تحرك طرف المتجه \dot{E}_0 على خط مستقيم يميل على الأفقى بالزاوية

$\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_a}$. يطاق على هذا الخط اسم خط معامل القدرة صفر

(zero active power factor line) ، أو خط القدرة الفعالة صفر (zero active

power line) ، إذ أنه عبارة عن المحل الهندسي لطرف المتجه \dot{E}_0 ، عندما

يتغير التيار غير الفعال في الآلة ، وتتغير القدرة غير الفعالة في الآلة ، فتتغير

القدرة غير الفعالة الداخلة إلى (حالة المولد) ، أو الخارجة من (حالة المحرك) ،

القضبان اللانهاية ، وتكون القدرة الفعالة ، ومعامل القدرة في الوقت نفسه ،

مساويين للصفر .

وفي (ب) نرى كيف يؤدي تغير التيار الفعال ، عندما يكون التيار غير

الفعال ، وبالتالي القدرة غير الفعالة ، مساويين للصفر ، إلى جعل طرف المتجه E_0 يتحرك على خط عمودي على الخط السابق ، أى يميل على الخط الرأسى بالزاوية θ . ويطلق على هذا الخط اسم خط معامل القدرة الوحدة (unity power factor line) أو خط القدرة غير الفعالة صفر (zero reactive power line) وهو عبارة عن المحل الهندسى لطرف المتجه E_0 ، عندما يتغير التيار الفعال فى الآلة ، وتغير القدرة الفعالة الداخلة إلى (حالة المولد) ، أو الخارجة من (حالة المحرك) ، الفضيحة اللانهائية . وتكون القدرة غير الفعالة مساوية للصفر ، ومعامل القدرة مساويا للوحدة .

وفى (٣) نرى كيف تتحدد نقطة تشغيل الآلة ، على حسب تحديد طرف المتجه E_0 ، على تقاطع خطين يوازى أحدهما خط القدرة الفعالة صفر ، ويوازى الثانى خط القدرة غير الفعالة صفر . ويبعد الخط الأول عن خط القدرة الفعالة صفر بالمسافة التى تمثل $I_p Z_p$ ، أى بما يتناسب مع قيمة المركبة الفعالة للتيار ؛ وبالتالي قيمة القدرة الفعالة فى هذه الحالة . لذلك يمكن اعتبار هذه المسافة ممثلة للقدرة الفعالة بمقياس رسم قدره معين ، واعتبار الخط الأول ممثلاً لهذا المستوى من القدرة الفعالة . بمعنى أن طرف E_0 يتحرك على هذا الخط ، عند ثبوت القدرة الفعالة على هذه القيمة ، و حدوث تغييرات أخرى فى الآلة .

ويبعد الخط الثانى عن خط القدرة غير الفعالة صفر بالمسافة التى تمثل $I_p Z_p$ أى بما يتناسب مع قيمة المركبة غير الفعالة للتيار ، وبالتالي قيمة القدرة غير الفعالة فى هذه الحالة . لذلك يمكن اعتبار هذه المسافة ممثلة للقدرة غير الفعالة بمقياس القدرة السابق تعيينه ، واعتبار الخط الثانى ممثلاً لهذا المستوى من القدرة غير الفعالة ، بمعنى أن طرف E_0 يتحرك على هذا الخط ، عند ثبوت القدرة غير الفعالة على هذه القيمة ،

وحدوث تغييرات أخرى في الآلة .

نستطيع بناء على ما سبق رسم ما يسمى بمخطط الحمل الكهربائي (Electrical load diagram) للآلة ، الذى تتحدد عليه مستويات مختلفة للقدرات الفعالة وغير الفعالة ، بحيث يمكن ، بمعرفة معلومات معينة ، تحديد نقطة تشغيل الآلة عليه ، ثم تتبع ما يحدث لها من تغييرات ، ومعرفة نتائج هذه التغييرات ، بالنسبة لخصائص التشغيل ، على مخطط الحمل بسهولة .

يبين شكل (١٢-٤) كيفية رسم مخطط الحمل الكهربائي لآلة متزامنة ، مقاومة ملفات المنتج المرحلية فيها R_a أوم ، وبممانعة التزامن المرحلية لها X_s أوم ، وتعمل على قضبان لا نهائية ضغطها المرحلى V . ترسم V بمقياس رسم مناسب ، ويمكن كل سنتيمتر واحد يساوى m فولت مثلا . عند نهاية V يرسم خط معامل قدرة صفر يصنع الزاوية $\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R_a}$ مع الأفقى ، ثم يرسم خط معامل قدرة الوحدة عموديا عليه . بالنسبة لتيار الحمل I ، الذى يصنع الزاوية ϕ مع V توجد المركبة الفعالة I_a ، ويكون هبوط الضغط الناتج عنها $ab = I_a Z_s$ فى اتجاه خط القدرة الوحدة بمقياس رسم الضغط ، والمركبة غير الفعالة I_r ، ويكون هبوط الضغط الناتج عنها $bc = I_r Z_s$ فى اتجاه يوازى خط معامل القدرة صفر بنفس مقياس رسم الضغط . يعطى الخط المرسوم من b فى اتجاه bc ، موازيا لخط معامل قدرة صفر ، مستوى القدرة الفعالة المناظرة للتيار I_a ، أى $3VI_a \cos \phi$ أو $3VI_a$. ويعطى الخط المرسوم من c ، موازيا لخط معامل قدره الوحده ، مستوى قدره غير الفعالة المناظرة للتيار I_r ، أى $3VI_r \sin \phi$ أو $3VI_r$. لذلك يمكن اعتبار ab ممثلا للقدرة الفعالة بمقياس رسم للقدرة ، و bc ممثلا للقدرة غير الفعالة بهذا المقياس ، و ac ممثلا للقدرة الظاهرية (apparent power)

بنفس المقياس . ويكون مقياس رسم القدرة أن كل سم يمثل y وات ، أوفولت أمبير بمائع ، أوفولت أمبير ، على حسب ما إذا كانت القدرة فعالة ، أو غير فعالة ، أو ظاهرية ، على الترتيب ، حيث :

$$y = \frac{3 V_m}{Z_s}$$

يمكن اعتبار أضلاع المثلث abc ممثلة للتيار ومركبته الفعالة وغير الفعالة ، بحيث يمثل ac التيار I ، و bc المركبة غير الفعالة لهذا التيار I ، و ab المركبة الفعالة للتيار I ويكون مقياس رسم التيار أن كل اسم يمثل $\frac{m}{Z_s}$ أمبير . هذا ويصنع ac الزاوية ϕ مع ab بحيث يكون ac أعلى الخط ab ، في حالة التيار المتأخر ، وأسفل ab في حالة التيار المتقدم ، في حالة المولد ، وللعكس في حالة المحرك .

باعتبار أن I هو تيار الحمل الكامل يمكن رسم مستويات القدرة المختلفة ، منسوبة إلى الحمل الكامل ، كما هو مبين في الشكل ، حيث تمثل c نقطة التشغيل عند الحمل الكامل ، ويمثل Oc ، بمقياس رسم الضغط ، القوة الدافعة الكهربائية E . ويمكن استخدام الشكل بعد ذلك في تحديد نقط التشغيل الجديدة ، على حسب مواصفاتها ، كما سوف يتضح من الأمثلة التالية . ويلاحظ في هذا المضمار أن مستويات القدرة المعطاة تكون ثابتة تماما على الخطوط المناظرة ، كما أننا نحصل ، عند ثبوت قيمة تيار التنبيه ، أو ثبوت التنبيه باختصار ، على دوائر تعطي مستويات تنبيه ثابتة ، منسوبة إلى التنبيه عند الحمل الكامل ، باعتباره 100% ، كما هو مبين على الشكل . ويلاحظ أنه يمكن نقل نقطة التشغيل على مستويات قدرة فعالة مختلفة ، تزداد قيمتها بزيادة قيمة الزاوية ϕ (من c إلى c_1 إلى c_2 ) ، حتى تصل إلى نهاية عظمى عند تقاطع الخط المرسوم من \odot موازيا لخط معامل قدرة الوحدة مع دائرة مستوى التنبيه المناظرة ، وينتج عن

ازدياد قيمة الزاوية δ بعد ذلك انخفاض في قيمة القدرة (تقاطع دائرة التنبيه مع مستوى أقل للقدرة). وبذلك تكون الآلة قد خالفت قواعد التزامم بالنسبة لعلاقة القدرة بالزاوية δ ، كما تعبر عنها المعادلة (١٢ - ٤). ويقال في هذه الحالة إن الآلة قد كسرت حدد التزامم (broke out of synchornism)، كما يطلق على الخط، الذي يرسم من O موازيا لخط معامل القدرة الوحدة، خط نهاية الاتزان (Limit of stability line)، لأنه يمثل في الواقع الحد الذي تخرج بعده الآلة عن حالة الاتزان. ويلاحظ من الشكل أن مستوى النهاية العظمى للقدرة، التي يستطيع المولد أن يعطيها للقضبان، يزداد بازدياد التنبيه، وبالتالي بازدياد قيمة E_0 .

يلاحظ أن خط معامل قدرة صفر، وخط معامل قدرة الوحدة، يقسمان مخطط الحمل الكهربائي إلى أربعة أقسام، حيث يختص القسمان في الناحية اليسرى من خط معامل قدرة صفر بالمولد، فيختص الربع الواقع أعلى خط معامل قدرة الوحدة بمعاملات القدرة المتأخرة، والربع الواقع أسفل خط معامل قدره للوحده بمعاملات القدرة المتقدمة. هذا ويختص القسمان في الناحية اليمنى من خط معامل قدرة صفر بالمشرك، فيختص الربع الواقع أعلى خط معامل قدره للوحده بمعاملات القدرة المتقدمة، والربع الواقع أسفل الخط بمعاملات القدرة المتأخرة.

ويلاحظ أنه بينما تكون القدرة الكهربائية $3VI \cos \phi$ في حالة المولد هي قدرة المخرج (output)، فإنها تمثل في حالة المشرك قدرة المدخل (input). لذلك يختص هذا المخطط بقدرة المخرج في حالة المولد، وقدرة المدخل في حالة المشرك. وعند استخدام هذا المخطط لحل المسائل الخاصة بالمشركات، يراعى أن اتجاه تيار

machine would supply the same power at unity power factor. Find for this value of the E.M.F the maximum power and the corresponding power and power factor which the machine would deliver to the busbars before it breaks out of synchronism.

لكي يمكن للآلة أن تعطي الحمل المطلوب للقضبان، عند معامل القدرة المحدد، يقوم عامل المحطة (station operator) بضبط المنظم للآلة الحرارية، وضبط تيار التنبيه، بالتتابع خطوة بخطوة، بحيث يمكن تحميل الآلة تدريجياً بعمليات قدرة مختلفة، عند أجزاء الحمل المختلفة، حتى يتم في النهاية ضبط التيار، السارى إلى القضبان، بقيمته عند الحمل الكامل، وضبط معامل القدرة المطلوب مع هذا التيار. هذا ويلاحظ أن تغيير قيمة الكيلووات، المأخوذ من الآلة، يكون عن طريق تغيير ضبط المنظم، بينما يكون تغيير معامل القدرة أساساً عن طريق تغيير تنبيه الآلة. ويسترشد العامل في خلال هذه العملية بقراءات الأجهزة المعدة لهذا الغرض، كما يمكن أن يسترشد أيضاً بمخطط الحمل الكهربائي للآلة، إذا كان جاهزاً أمامه.

يبين شكل (١٣ - ٤) مخطط الحمل الكهربائي للآلة، مرسوماً على أساس المعلومات الآتية:

$$I = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 11 \times 0.8} = 196.3 \text{ A} , I_a = 157.2 , I_r = 118$$

$$V = \frac{11000}{\sqrt{3}} = 6350 \text{ V}$$

$$Z_s = \sqrt{(15)^2 + (1)^2} = 15.05 \text{ ohms}$$

$$I_a Z_s = 2365 \text{ V} , I_r Z_s = 1775 \text{ V}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{15}{1} \approx 86^\circ 12'$$

مقاييس الرسم :

$$1 \text{ cm} = 1000 \text{ V} = \frac{1000}{15.05} \approx 66.5 \text{ A}$$

$$= \frac{3000 \times 6350}{10^3 \times 15.05} = 1270 \text{ KW}$$

القوة الدافعة الكهربائية عند الحمل الكامل :

$$E_o = 8.63 \text{ cms} = 8630 \text{ V}$$

لكي تعطى الآلة نفس الحمل الكامل (القدرة الفعالة) ، عند معامل قدرة الوحدة ، يجب أن يتحرك المحرك E_o على نفس خط القدرة الفعالة حتى يقع على النقطة b ، فتكون قيمة القوة الدافعة الكهربائية في هذه الحالة هي E'_o يساوي . Ob

$$E'_o = 7 \text{ cms} = 7000 \text{ V}$$

قيمة النهاية المعظمى للقدرة التي يعطيها المولد للقضبان اللانهاية ، قبل أن يخرج عن حد الاتزان ممثلة بالمسافة ad ، وذلك عندما يكون التنبيه كما هو عند b ، أى مع القوة الدافعة الكهربائية E'_o .

$$ad = 6.4 \text{ cms} = 8120 \text{ KW}$$

وفي هذه الحالة نجد أن :

$$I_m Z_s = 9.05 \text{ cms} = 9050 \text{ V} , \quad I_m = 600 \text{ A}$$

$$\phi_m = 45^\circ \text{ leading} , \quad \cos \phi_m = 0.707$$

مثال (٢) :

a 3—phase synchronous generator has the following open circuit characteristic :

Field current (amps)	: 0	32	50	75	100	140
open circuit E.M.F/phase	: 0	1800	2830	3810	4380	4790

The armature has a resistance of 0.5 ohm and a synchronous reactance of 5 ohms per phase. The machine is synchronised and connected to 6600 volt infinite bus bars to which it delivers 4000 KW, when the field current is adjusted to a value of 130 amperes. Find the machine current and power factor.

If the steam admission is increased by 40 % and the field current is adjusted to 100 amps., find the new values of the machine current and power factor. at what value of the field current would the machine deliver a maximum power of 6500 KW, before it breaks out of synchronism ?

$$V = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3810 \text{ V} , \quad I_a = \frac{4000}{\sqrt{3} \times 6.6} = 350 \text{ A} ,$$

$$Z_s = 5.03$$

(انظر شكل ١٤ - ٤)

عندما يكون تيار التنبيه 130 أمبير نحصل على قوة دافعة كهربية مرحلية من منحني الدائرة المفتوحة مقدارها $E_o = 4700$ فولت . نأخذ مقاييس الرسم :

$$1 \text{ cm} = 500 \text{ V} = \frac{500}{5.03} = 99.3 \text{ A} = \frac{1500 \times 3810}{5.03 \times 10^3}$$

$$= 1136 \text{ Kw}$$

$$I_a Z_s = 1762.5 \text{ V} = 3.53 \text{ cms} , \quad V = 7.62 \text{ cms}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{5}{0.5} \approx 84^\circ 18' \quad ab = \frac{4000 \text{ KW}}{1136} = 3.53 \text{ cms}$$

يمكن تحديد النقطة b باعتبار ab يمثل هبوط الضغط $I_a Z_s$ ، أو باعتباره يمثل قدرة الحمل الفعالة 4000 كيلوات . بذلك يتحدد مستوى الحمل الكامل ، الذى يمر بالنقطة b ، ويوازى خط معامل القدرة صفر . النقطة c ، وهى نقطة التشغيل عند الحمل الكامل ، تقع على هذا الخط ، وتحدد على أساس أن Oc يمثل E_0 ، أى أن :

$$Oc = \frac{4700}{500} = 9.4 \text{ cms}$$

نحصل من الرسم على النتائج الآتية ، بالنسبة لنقطة التشغيل c :

$$\phi = 13.5^\circ , \quad \cos \phi = 0.9724 \text{ lagging}$$

$$IZ_s = 3.6 \text{ cms} = 1800 \text{ V} , \quad I \approx 363 \text{ A}$$

عندما يزداد دخول البخار بمقدار 40 % (من طريق ضبط المنظم) تزداد القدرة الفعالة التى يعطيها المولد للقضبان بحيث تصبح $1.4 \times 4000 = 5600$ كيلوات . وعند ضبط تيار التنبيه على 100 أمبير تصبح قيمة E_0 الجديدة ، كما نحصل عليها من منحنى الدائرة المفتوحة هى $E'_0 = 4330$. يقع طرف E'_0 على خط القدرة 5600 كيلوات ، كما هو مبين فى شكل (١٤-٤) ، فتحدد نقطة التشغيل الجديدة c' . ونحصل من الشكل على النتائج الآتية :

$$\phi' = 12.5^\circ , \quad \cos \phi' = 0.9763 \text{ leading}$$

$$I'Z_s = 5 \text{ cms} = 2500 \text{ V} , \quad I' = 5 \times 99.3 = 496.5 \text{ A}$$

برسم خط النهاية العظمى للقدرة على مستوى 6500 كيلووات نجد أن aB يساوي $5.7 = \frac{6500}{1136}$ من السنتيمترات ، وتكون E ممثلة في هذه الحالة بالطول Oe ، بينما يكون $I_m Z_s$ ممثلاً بالطول ac .

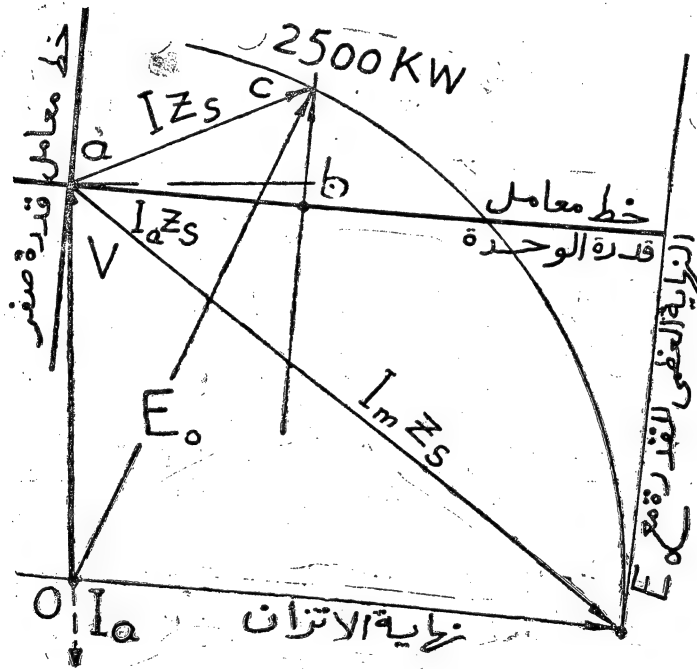
$$E_o = 6.6 \times 500 = 3300 \text{ V} \quad , \quad I_f \approx 60 \text{ A (تيار التنبية)}$$

$$I_m Z_s = 9.6 \times 500 = 4800 \text{ V} \quad , \quad I_m = 9.6 \times 99.3 \approx 955 \text{ A}$$

مثال (۲) :

How can the active and reactive powers, delivered by a synchronous generator to infinite busbars, be changed?

A 3 phase, star connected synchronous generator has an effective resistance and synchronous reactance per phase of 0.75 ohm and 10 ohms respectively. It is connected to 6600 V, 50 c/s infinite busbars to which it delivers 2500 KW. When the induced line E.M.F is adjusted to 9000 V, find the line current and power factor. Find also the stalling current at this value of excitation and the efficiency, assuming mechanical, iron and excitation losses of 120 KW



شكل (١٥-٤)

يبين شكل (١٥-٤) كيفية رسم خطط الحمل الكهربائي في هذه الحالة ، وذلك باستخدام تيار مضاد في الاتجاه لتيار المولد .

$$I_a = \frac{2500}{\sqrt{3} \times 6.6} = 219 \text{ A} ,$$

$$V = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3810 \text{ V} , \quad Z_s = 10.03 \Omega$$

$$E_o = \frac{9000}{\sqrt{3}} = 5200 \text{ V} ,$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{10}{0.75} = 85^\circ 43'$$

مقاييس الرسم :

$$1 \text{ cm} = 500 \text{ V} = \frac{500}{10.03} = 49.7 \text{ A} = \frac{1500 \times 3810}{10.03 \times 10^3} = 570 \text{ KW}$$

يمكن تحديد النقطة b باعتبار ab ممثلاً للتيار I_a بمقياس رسم التيار، أو ممثلاً للضغط $Z_s I_a$ بمقياس رسم الضغط، أو ممثلاً للقدرة الفعالة KW بمقياس رسم القدرة، فنجد أن :

$$ab = \frac{219}{49.7} = \frac{2500}{570} = \frac{219 \times 10.03}{500} = 4.4 \text{ cms}$$

يرسم من b خط مستوى القدرة الفعالة 2500 كيلوات، يوازي خط معامل القدرة صفر، وتحدد عليه نقطة التشغيل عند الحمل الكامل C، بحيث يكون Oc ممثلاً للقوة الدافعة الكهربائية E_o ، حيث يكون Oc مساوياً 10,4 من السنتيمترات $\left(\frac{5200}{500} = \right)$ نحصل من الشكل على التيار I (ممثلاً ac بمقياس رسم التيار)، وزاوية الاختلاف المرحلي ϕ ، ومعامل القدرة، حيث :

$$I = 245 \text{ A} , \cos \phi = 0.90 \text{ leading}$$

تيار التوقف (stalling current) هو أقصى قيمة للتيار يستطيع المحرك أن يأخذها من الشبكة قبل خروجه عن حد الاتزان مباشرة ، أى أنه هو التيار I_m المناظر لقيمة النهاية العظمى للقوة مع E_o المعطاه ، ونحصل عليه بطريقة مماثلة لتلك التي حصلنا بها عليه في حالة المولد ، كما هو مبين في شكل (١٥-٤) .

$$I_m = 672 \text{ A} , \cos \phi_m = 0.837 \text{ lagging}$$

لحساب معامل الجودة نحسب المفقودات النحاسية $I^2 R_a$:

$$I^2 R_a = (245)^2 \times 0.75 \times 10^{-3} = 45 \text{ KW}$$

المفقودات الكلية :

$$120 + 45 = 165 \text{ KW}$$

$$\eta = \frac{2500}{2500 + 165} = 0.937 = 93.7 \%$$

المحرك المتزامن على القضبان اللانهائية :

(Synchronous motor on infinite bus - bars)

يمكننا أن نجعل الآلة المتزامنة العائمة على القضبان اللانهائية ، بعد إجراء عملية التزامن وقفل مفتاح التزامن ، تعمل كولد أو كمحرك . ففي الحالة الأولى تغذى الآلة بالقوة الميكانيكية على عمود الإدارة ، مما يؤدي إلى تقدم محاور الأقطاب الرئيسية ، على محاور المجال المغناطيسى لرد فعل المنتج ، بالزاوية المناظرة δ (موجبة في هذه الحالة) ، وفي الحالة الثانية يوضع حمل ميكانيكى على عمود الإدارة ، مما يؤدي إلى تأخر محاور الأقطاب الرئيسية ، عن محاور المجال المغناطيسى

لرد فعل المنتج، بالزاوية المناظرة δ (سالبة في هذه الحالة). وعندما تعمل الآلة كمحرك فإنها تأخذ قدرة مدخل من القضبان اللانهاية مقدارها $3 VI \cos \phi$ ، حيث ϕ هي زاوية الاختلاف المرحلي بين ضغط القضبان الثابت، و تيار الحمل الذي تسحبه الآلة من هذه القضبان. وقد سبق أن بينا أننا نستطيع، عند عكس اتجاه التيار، استخدام مخطط الحمل الكهربائي، بالنسبة لقدرة المدخل في حالة المحرك، بنفس الطريقة التي استخدم بها في حالة المولد. ويعني عكس اتجاه التيار هنا أن تأثير تيار المحرك معاكس لتأثير تيار المولد، إذ بينما يعطى التيار المتأخر، في حالة المولد، تأثيراً مغناطيسياً مضاداً (demagnetising effect) على الأقطاب الرئيسية، نجد أن التيار المتأخر يعطى تأثيراً مغناطيسياً مساعداً (magnetising effect)، في حالة المحرك. لذلك نجد أن E_0 أكبر من V في المولد، و E_0 أصغر من V في المحرك، عندما يكون التيار متأخراً، كما يتضح من مخطط الحمل الكهربائي. وبالعكس نجد أنه عندما يكون التيار متقدماً، فإن E_0 تكون أصغر من V في حالة المولد، نتيجة للتأثير المغناطيسي المساعد لتيار الحمل على الأقطاب الرئيسية، وتكون E_0 أكبر من V في حالة المحرك، نتيجة لتأثير التيار المغناطيسي المضاد على الأقطاب الرئيسية.

نخرج مما سبق بنتيجة عامة، بالنسبة للمحرك المتزامن، وهي أننا نستطيع أن نجعل هذا المحرك يسحب تياراً سعوياً (متقدماً على الضغط) من القضبان، بزيادة تيار التنبيه، بحيث تصبح E_0 أكبر من V . ويوصف المحرك في هذه الحالة بأنه يعمل بتثبيته زائد (overexcited)، وهو يعمل، بالتيار السعوى الذي يسحبه من القضبان، على تحسين معامل القدرة (power — factor)، (Improvement) إذا كانت الأحوال الأخرى على القضبان معظمها حثية. لذلك

تستخدم المحركات المتزامنة لتحسين معامل القدرة في خطوط النقل الكهربائية ،
فيوصل محرك متزامن عند نقطة الاستقبال (receiving end) في الخط ، أو عند
مركز ثقل الأحمال (centre of gravity of load) ، ويدار بدون حمل ،
وبتفنيه زائد ، لكي يعمل على تحسين معامل القدرة ، مما يؤدي إلى خفض قيمة
هبوط الضغط في الخط ، وبالتالي تحسين معامل التنظيم لهذا الخط . ويطلق على
المحرك المتزامن حينئذ اسم المكثف المتزامن (synchronous condenser)

عزم دوران المحرك : إذا راعينا أن الجزء $3I^2 R_a$ من القدرة الداخلة
للمحرك $3VI \cos \phi$ يبدد كمفقودات نحاسية في ملفات المنتج ، فإننا نستطيع
حساب عزم دوران المحرك الكلي (total torque) T_e من القدرة الكهربائية P_e
على النحو التالي :

$$P_e = 3VI \cos \phi - 3I^2 R_a = 3E_o I \cos \psi \text{ watts (٢١-٤)}$$

$$T_e = \frac{P_e}{2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81} = 0.973 \frac{P_e}{n_s} \text{ Kg.m.}$$

$$= P_e \text{ synchronous watts} \quad \dots \quad (٢٢-٤)$$

ويكون عزم الدوران الفرمل T (Kg.m) للحمل ، الذي نحصل عليه في
النهاية ، مناظراً للقدرة الفرملية بالحصان (brake horsepower) ، وهي عبارة
عن القدرة P_e ، بعد طرح مفقودات الحديد والمفقودات الميكانيكية P_e منها ،
حيث :

$$P_e - P_c = 746 \text{ BHP} = T \times 2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81$$

$$T = 727 \text{ BHP Kg.m.} \quad \dots \quad (٢٢-٤)$$

وبالاحظ. أنه عند وجود مولد متزامن على قضبان لانهائية ، فاننا نستطيع أن نخفف الحمل عليه تدريجياً (عن طريق ضبط المنظم) ، حتى يصبح بدون حمل ويصبح عائماً مرة أخرى على القضبان ، وبذلك يمكن تحميل عمود الإدارة بحمل ميكانيكى ، والآلة دائرة بسرعة التزامن ، فى نفس الاتجاه ، فينعكس اتجاه التيار ويصبح سارياً من القضبان إلى الآلة ، بعد أن كان يسرى من الآلة إلى القضبان . هذا ويمكن تغيير قيمة التيار ، وزاوية اختلافه المرحلى ، عن طريق تغيير الحمل الميكانيكى على عمود الإدارة ، وهو ما ينساظر ضبط المنظم ، أو تغيير القدرة المحركة فى حالة المولد ، ثم عن طريق تغيير التنبيه ، تماماً كما حدث بالنسبة للمولد .

تغيير تيار المنتج فى المحرك نتيجة لتغيير التنبيه مع ثبوت قدرة المخرج :
تمثل القدرة P_e فى المعادلة (٢١-٤) القدرة الميكانيكية الكلية ، التى ينتجها المحرك على عمود الإدارة ، وهى تزيد عن القدرة الميكانيكية الفرملية ، التى نستفيد بها فى الحمل ، بالمفقودات الميكانيكية ومفقودات الحديد . ونظراً لأن هذه المفقودات ثابتة تقريباً ، فاننا نستطيع اعتبار أن P_e هى القدرة الميكانيكية التى نحصل عليها حتى يمكن استخدام المعادلة (٢١-٤) فى تحليل خصائص المحرك ، وذلك بتعديلها على النحو التالى :

$$I^2 - \frac{V}{R_a} I \cos \phi = - \frac{P_{e1}}{R_a} \left(P_{e1} = \frac{P_e}{3} = \text{القدرة المرحلية} \right)$$

وبإضافة $\left(\frac{V}{2R_a} \right)^2$ إلى حدى هذه المعادلة ، نجد أن :

$$I^2 + \left(\frac{V}{2R_a} \right)^2 - 2 \left(\frac{V}{2R_a} \right) I \cos \phi = \left(\frac{V}{2R_a} \right)^2$$

$$- \frac{P_{e1}}{R_a} \dots \dots \dots (٢٤-٤)$$

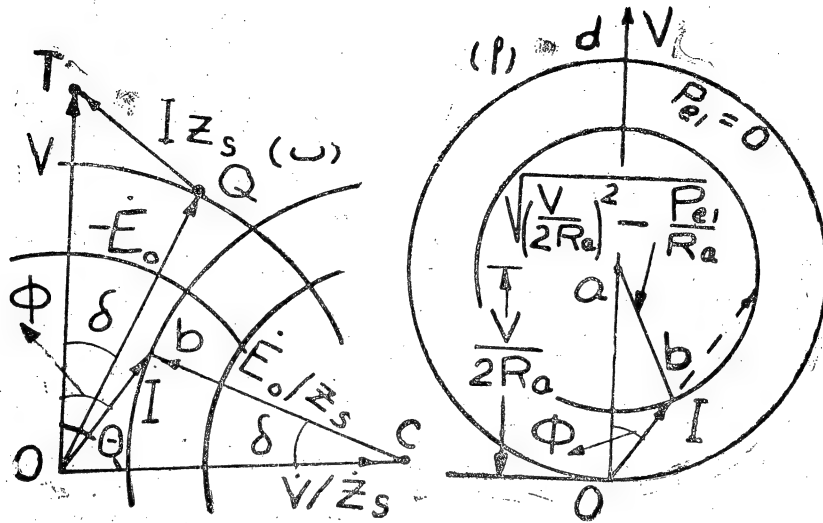
يمثل الحد $\frac{V}{2R_a}$ تياراً في اتفاق مرحلي مع V (لأن المقسوم عليه — مقاومة) ، وبذلك نجد أن الحد الأيسر من المعادلة (٢٤ — ٤) عبارة عن مجموع مربعي تيارين ، مطروحاً منه ضعف حاصل ضرب هذين التيارين في جتا الزاوية بينهما ، مما يعني أن هذين التيارين يكونان ضلعي مثلث يكون ضلعه الثالث هو

$$\sqrt{\left(\frac{V}{2R_a}\right)^2 - \frac{R_{e1}}{R_a}} \text{ أى (٢٤ — ٤)}$$

ويمكن رسم هذا المثلث بمقياس رسم معين للتيار ، فنحصل على المثلث Oab ، كما هو مبين في شكل (١٦ — ٤ أ) ، وذلك عند قيمة معينة للقدره P_e (الحل الكامل) ، التى يسحب عندها المحرك تياراً معيناً I ، عند معامل قدرة معين $\cos \phi$ ، من القضبان الانتهائية . ويلاحظ أننا نكون بهذه الطريقة قد قننا بحل المعادلة (٢٤ — ٤) بالرسم . وفي هذه الحالة يجب أن يكون أى من I أو ϕ معلوماً مع P_e ، لكي يمكن تحديد الثاني فيها . فإذا كانت P_e ثابتة (أى أن الحمل الميكانيكى على عمود الإدارة يظل ثابتاً) ، فأننا نحصل على قيم مختلفة للتيار على حسب تغير قيمة ϕ ، نتيجة لتغير تنبيه الآلة . وفي الحقيقة أننا نحصل على قيمتين للتيار I ، عند كل قيمة لزاوية الاختلاف المرحلي ϕ ، أو عند تنبيه معين الآلة ، وبالأحرى عند معامل القدرة $\cos \phi$ ، كما يتضح من حل المعادلة (٢٤ — ٤) بالنسبة لـ I ، حيث :

$$I = \frac{V}{2R_a} \cos \phi \mp \sqrt{\left(\frac{V}{2R_a} \cos \phi\right)^2 - \frac{P_{e1}}{R_a}} \quad (٢٥ — ٤)$$

وبالنسبة للحل بالرسم ، المبين في شكل (١٦ — ٤) ، نجد أن ثبوت قيمة P_e يؤدي إلى ثبوت طول المستقيم ab ، مما يعني أن المحل الهندسى لطرف متجه التيار I ، عندما تتغير ϕ ، في هذه الحالة ، على محيط دائرة مركزها o ، ونصف



شكل (١٦-٤)

قطر ab ، الذى يمثل المقدار $\sqrt{\left(\frac{V}{2R_a}\right)^2 - \frac{R_{e1}}{R_a}}$ (وهو تيار أيضا) ويكون لكل قيمة للزاوية ϕ قيمتان للتيار I ، إحداهما كبيرة (الخط المتقطع) نرفضها، والثانية أصغر منها نأخذ بها.

بمراجعة المعادلة (٢٥-٤) ، نجد أنه عندما تكون P_e تساوى صفرا ، مما يعنى عدم وجود حمل ميكانيكى على عمود الادارة ، وهى حالة اللاحمل ، فان قيمة التيار I إما أن تساوى صفرا (وهى القيمة المعقولة التى نأخذ بها) ، وإما أن تساوى $\frac{V}{R_a} \cos \phi$ (قيمة غير معقولة ولا نأخذ بها) . فاذا كانت ϕ تساوى صفرا ، فان هذا يعنى أن نصف قطر الدائرة المناظر فى الرسم هو $\frac{V}{2R_a}$. وتكون هذه الدائرة هى المحل الهندسى لطرف متجه التيار I فى حالة اللاحمل .

هذا ، وإن وجود الإشارة السالبة قبل الحد $\frac{P_{e1}}{R_a}$ تحت الجذر يستدعي
 ألا تزيد قيمة القدرة P_e عن حد معين ، حتى نحصل على قيم حقيقية للتيار I .
 وهذه هي قيمة النهاية العظمى للقدرة الميكانيكية P_{emax1} ، التي يمكن أن نحصل
 عليها من المحرك ، وهي تتحدد بالقيمة التي تجعل المقدار $\frac{P_{e1}}{R_a} - \sqrt{\left(\frac{V}{2R_a}\right)^2}$
 يساوى صفرا ، (عندما تساوى ϕ صفرا أيضا) ، فتكون :

$$P_{emax1} = \frac{V^2}{4R_a} \quad \dots \dots \dots (٢٦-٤)$$

وتؤول الدائرة في هذه الحالة إلى النقطة a (نصف القطر ab يساوى صفرا)
 وتكون قيمة التيار المناظرة (قيمة واحدة فقط) هي $\frac{V}{2R_a}$. وهذا يعني أن
 قيمة قدرة المدخل تصبح $V \left(\frac{V}{2R_a} \right)$ أى $\frac{V^2}{2R_a}$ ، لكل مرحلة من مراحل
 المحرك . وتكون القدرة المفقودة في ملفات المنتج عبارة عن $R_a \left(\frac{V}{2R_a} \right)^2$
 أى $\frac{V^2}{4R_a}$ ، وهي نصف قيمة قدرة المدخل ، بما يعنى أن قيمة معامل الجودة
 أصبحت 50 % في هذه الحالة .

نستخلص مما سبق أنه عند ثبوت قيمة القدرة P_e ، وتغيير تنبيه المحرك ،
 فإن طرف متجه التيار I يقع على محيط دائرة تحددها القيمة P_e ، بحيث يكون
 لكل قيمة دائرة معينة . هذا ولا يؤثر تغيير التنبيه على قدرة المخرج الميكانيكية :
 تغيير تيار المنتج في المحرك نتيجة لتغيير قدرة المخرج مع ثبوت تنبيه الآلة :

سبق أن بينا أن المعادلة (٢٠-٤) التي تربط بين القوة الدافعة الكهربائية E_g
 التي تتولد في المولد ، والضغط V على أطرافه ، والتيار I الذي يسرى منه ، تعنى

أن متجه القوة الدافعة الكهربائية \vec{E} يتكون من مركبتين، أحدهما عبارة عن متجه الضغط المرحلي على أطراف المولد \vec{V} ، والثانية تساوى هبوط الضغط $\vec{I} \cdot \vec{Z}$ في كل مرحلة من مراحل المولد وتضاده في الاتجاه . لذلك نجد أنه في جميع مخططات المتجهات الخاصة بالمولد يجب أن نلاحظ أن رأس السهم على كل من \vec{V} و \vec{E} يشير إلى الوضع المرحلي الفعلي لهما ، بينما يشير رأس السهم على المتجه $\vec{I} \cdot \vec{Z}$ في عكس اتجاه متجه هبوط الضغط الفعلي في المنتج ، على أساس أن ما يشير إليه هو مركبة المتجه \vec{E} ، اللازمة لمعادلة متجه هبوط الضغط ، وهي لذلك تضاده في الاتجاه وتساويه في المقدار . وقد كان من الممكن كتابة المعادلة بالصورة التي تتمشى مع قانون كيرشوف، على أساس أن الضغط الطرقي \vec{V} هو محصلة الضغط \vec{E} ، مضافا إليه هبوط الضغط $\vec{I} \cdot \vec{Z}$ ، الذي يجمع مع \vec{E} في هذه الحالة باتجاهه الأصلي ، وهو عكس الاتجاه المعطى .

لكي نحصل على معادلة ، مماثلة للمعادلة (٢٠ - ٤) ، بالنسبة للمحرك ، يجب أن نراعى أن الضغط المرحلي \vec{V} للقضبان ، التي يصرى منها التيار \vec{I} للمحرك عند معامل قدرة معين $\cos \phi$ ، يجب أن يحتوى على المركبة $\vec{I} \cdot \vec{Z}$ ، التي تساوى هبوط الضغط المرحلي في المنتج وتضاده في الاتجاه ، وكذلك على المركبة \vec{E} ، التي تساوى القوة الدافعة الكهربائية المرحلية \vec{E} المضادة (حالة المحرك) وتضادها في الاتجاه . ويكون التعبير عن ذلك بمعادلة مماثلة للمعادلة (٢٠ - ٤) على النحو التالي :

$$\dot{\mathbf{V}} = - \dot{\mathbf{E}}_0 + \dot{\mathbf{I}} \dot{\mathbf{Z}}_s \dots \dots \dots (٢٧-٤)$$

يبين شكل (١٦-٤) مخطط المتجهات للمحرك على أساس المعادلة (٢٧-٤)، كما تمثلها أضلاع المثلث OQT . بقسمة حدود المعادلة (٢٧-٤)

على $\dot{\mathbf{Z}}_s$:

$$\frac{\dot{\mathbf{V}}}{\dot{\mathbf{Z}}_s} = - \frac{\dot{\mathbf{E}}_0}{\dot{\mathbf{Z}}_s} + \dot{\mathbf{I}}$$

$$\therefore \dot{\mathbf{I}} = \frac{\dot{\mathbf{V}}}{\dot{\mathbf{Z}}_s} + \frac{\dot{\mathbf{E}}_0}{\dot{\mathbf{Z}}_s} \dots \dots \dots (٢٨-٤)$$

إن كل حد في المعادلة (٢٨-٤) عبارة عن متجه ذى قيمة ، التى هى عبارة عن قيمة الحد المناظر في المعادلة (٢٧-٤) مقسومة على $\dot{\mathbf{Z}}_s$ ، وهو متأخر عن متجه هذا الحد المناظر بالزاوية θ ، كما هو مبين في شكل (١٦-٤ب) ، حيث تمثل أضلاع المثلث Ocb حدود المعادلة (٢٨-٤) .

تنوقف قيمة الزاوية δ ، في كل من المثلثين OQT , Ocb ، على مقدار الحمل الميكانيكى (القدرة P_e) على المحرك . وعندما يكون تنبيه المحرك ثابتا عند قيمة معينة ، والحمل الميكانيكى متغيرا ، فإن النقطة Q تتحرك على محيط دائرة يتوقف نصف قطرها على \mathbf{E}_0 ، وبالتالي على تنبيه الآلة الثابت . وفي نفس الوقت تتحرك النقطة b على محيط دائرة أيضا ، يمثل نصف قطرها القيمة $\frac{\mathbf{E}_0}{\mathbf{Z}_s}$ الثابتة أيضا . وتتحدد بذلك قيمة كل من I و ϕ على حسب قيمة δ ، التى يحددها الحمل الميكانيكى المتغير ، عند تنبيه معين ثابت للآلة . وبتغيير التنبيه، وتنبيهه عند قيم

شکل (۱۷-۲)

نرسم من a دوائر القدرة الميكانيكية الثابتة ، وتكون أكبرها هي دائرة القدرة $P_{e1} = 0$ أى اللاحمل ونصف قطرها ad يساوى $\frac{V}{2R_a}$ ، كما سبق بيانه فى شكل (١٦-٤) . ثم نرسم من C دوائر التنبيه الثابت ، وهى التى تمثل قيا مختلفة للتنبيه فى الآلة ، الذى يتناسب مع القيمة $\frac{E_o}{Z_s}$ ، كما سبق بيانه فى شكل (١٦-٤ب) .

تقاطع كل دائرة من دوائر التنبيه الثابت مع دائرة القدرة الثابتة $P_{e1} = 0$ ، أو عند اللاحمل ، فى نقطتين ، بما يعنى أننا إذا احتفظنا بالحمل الميكانيكى ثابتا عند هذا المستوى ، وقفنا بتغيير تنبيه المحرك ، فأننا نحصل على قيمتين مختلفتين لتيار المنتج I عند كل قيمة لتيار التنبيه أو $\frac{E_o}{Z_s}$ ، فنحصل على التيارين $01'$ و 01 مع دائرة التنبيه الصغرى ، التى نصف قطرها $C1$ ، ونحصل على التيارين $02'$ و 02 مع دائرة التنبيه التى تليها ، التى نصف قطرها $C2$ ، وهكذا . ويلاحظ أننا نحصل على تيار المنتج يساوى صفرا عند النقطة $3'$ مع دائرة التنبيه الثالثة ، التى نصف قطرها $C3$ ، وتكون قيمة التيار الأخرى هى 03 . وعندما يكون التنبيه صفرا ، أى عندما تؤول دائرة التنبيه إلى النقطة C ، فأننا نحصل على قيمة واحدة للتيار هى $0C$. ونحصل على قيمة واحدة للتيار مرة أخرى عندما تمس دائرة التنبيه ، التى نصف قطرها $7'$ و $C7$ ، دائرة القدرة فى النقطتين المنطقتين $7'$ و 7 .

برسم المنحنى الذى يربط بين تيار الحمل I ، وتيار التنبيه أو $\frac{E_o}{Z_s}$ ، من النتائج السابقة ، نحصل على منحنى O المحرك عند اللاحمل ، ويكون الجزء الأسفل من هذا المنحنى بين النقطة C والنقطتين $7'$ و 7 شكل (١٧-٤ب) ، وهو منحنى V المحرك عند اللاحمل

أيضا . ويمكن رسم منحنيات 0 ومنحنيات ٧ أخرى ، عند مستويات قدرة مختلفة ، بنفس الطريقة ، كما هو مبين في شكل (١٧ - ٤ ، أ ، ب) بالنسبة لمستوى القدرة P'_{e1} .

بدراسة هذه المنحنيات نلاحظ ما يأتي :

١ — نحصل على قيمة واحدة لتيار المنتج عندما يكون التنبيه في نهايته الصغرى مع الحمل المقرر . وتحدد هذه النهاية الصغرى للتنبيه بدائرة التنبيه الصغرى المماسية لدائرة الحمل ، مثال ذلك النقطة C' شكل (١٧ - ٤ ، أ ، ب) . كذلك نحصل على قيمة واحدة لتيار المنتج مرة أخرى ، عندما يكون التنبيه في نهايته العظمى مع الحمل المقرر ، مثال ذلك النقطتان المنطقتان $7'$ و 7 ، والنقطتان المنطقتان $8'$ و 8 . وتحدد هذه النهاية العظمى للتنبيه بدائرة التنبيه الكبرى المماسية لدائرة الحمل المقرر .

٢ — نحصل على أصغر قيمة لتيار المنتج ، عندما يساوى معامل القدرة الوحدة ، ويكون ذلك عند قاع منحنى ٧ ، كما هو مبين في شكل (١٧ - ٤ ، ب) حيث يربط بين نقط معامل قدرة الوحدة المتناظرة ، على منحنيات القدرة المختلفة ، الخط المتقطع ، المشار اليه بمعامل قدره الوحدة ، وتكون تيارات المنتج على يمين هذا الخط متقدمة على الضغط ، كما تكون تيارات المنتج على يسار الخط متأخرة عن الضغط .

٣ — نظرا لأن تيارات المنتج في الجزء العلوى من منحنى 0 (عند الاحمال المختلفة) تكون كبيرة ، بالنسبة لتيارات المنتج على الجزء السفلى ، ومع نفس الحمل ، يقتصر اهتمامنا على منحنيات ٧ فقط ، وخاصة أن المحرك يخرج عن حد

الاتزان في الأجزاء العلوية من منحنيات O ، مما يؤدي إلى توقفه عند تشغيله في حدود هذه الأجزاء .

مثال :

What is the maximum output of a 3-phase, mesh connected, 250 V, 20 h.p., synchronous motor when the generated electromotive force is 320 V ? The effective resistance and synchronous reactance per phase are respectively 0.3 ohm and 4.5 ohms. The friction, windage, iron and excitation losses total 800W, and are assumed to remain constant. Give values for (a) horse power (b) line current (c) power factor (d) ratio of stalling current to full-load current at this value of the excitation.

لكي نحصل على النهاية العظمى للقوة عند تنبيه معين يجب أن تمس دائرة هذا التنبيه دائرة القدرة المطلوبة عند النقطة b ، التي تقع على خط المركز aC كما في شكل (١٨ - أ) ، وهي تناظر C' في شكل (١٧ - أ) .

$$Z_s = \sqrt{(0.3)^2 + (4.5)^2} \approx 4.51 \text{ ohms}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{4.5}{0.3} = 86^\circ 10'$$

$$\frac{V}{Z_s} = 55.4 \text{ A} , \quad \frac{E_o}{Z_s} = 70.9 \text{ A} ,$$

$$\frac{V}{2R_a} = 416 \text{ A}$$

بهذا نكون قد حصلنا على قيمة التيار ، ومعامل القدرة ، ثم قيمة النهاية العظمى للقدرة بالحضان (P_e) عند هذه القيمة من التنبيه ($E_o = 320 \text{ V}$) . ونظراً لأن زيادة القدرة على المحرك عن هذه القيمة ، مع هذا التنبيه ، يؤدي إلى خروجه عن حدود الاتزان ، وتوقفه بعد ذلك ، فإن التيار الذي حصلنا عليه هو في الواقع تيار التوقف (stall current) . قدرة المخرج عند الحمل الكامل 20 حصان تساوي 14920 وات ، وبإضافة 800 وات إليها نحصل على P_e عند الحمل الكامل ، ومنها نحصل على P_{e1} وهي تساوي 5240 وات في هذه الحالة ، وهذا يحدد نصف قطر دائرة القدرة ab' عند الحمل الكامل حيث :

$$ab' = \sqrt{(416)^2 - \frac{5240}{0.8}} = 304 \text{ A} = 7.88 \text{ cms}$$

$$Ob' = 0.55 \text{ cm} = 27.5 \text{ A} \quad \text{تيار الحمل الكامل :}$$

نسبة تيار التوقف إلى تيار الحمل الكامل :

$$\frac{93}{27.5} = 3.43$$

ملحوظة : يلاحظ أن الأشكال مصغرة بنسب مختلفة علاوة على مقاييس الرسم

مثال (٣) :

3. A 3 phase, 4 pole, 500 volts, 50 c/s, star connected synchronous motor has a resistance and synchronous reactance of 1 ohm and 5 ohms per phase respectively. If it takes a current of 20 Amps at 0.8 power factor lagging, when operating with a certain field current, and then the load torque is increased until the line current becomes 60 Amps, the field current remaining unchanged, find the total torque developed, and the new power factor.

$$Z_s = \sqrt{(5)^2 + (1)^2} = 5.1 \text{ ohms } \theta = \tan^{-1} 5 = 78^\circ 42'$$

$$P_1 = \sqrt{3} \times 500 \times 20 \times 0.8 = 13856 \text{ KW}$$

يمكن الحصول على قدرة المخرج الكهربائية P_e ، في هذه الحالة، بطرح $3I^2 R_a$ من P_1 ، وحل المسألة بعد ذلك باستخدام الطريقة المبينة في شكل (١٧-٤ أ)، كما حدث في المسألة السابقة. ولكن وجود قدرة المدخل الكهربائية يجعلنا نفضل استخدام مخطط الحمل الكهربائي، مع توفر المعلومات اللازمة لذلك، حيث يمكن رسم المتجهات أكثر طولاً، مما يجعلنا نحصل على نتائج أكثر دقة. وفي الواقع أن مخطط الحمل الميكانيكي، الوارد في شكل (١٧-٤ أ)، والذي استخدمناه في حل المسألة السابقة، يؤول إلى مخطط الحمل الكهربائي، عندما تصبح $P_1 = P_e$ أى عندما نفترض أن R_a تساوى صفراً، مما يؤدي إلى اختفاء مفقودات النحاس في ملفات المنتج. حينئذ يصبح مركز دوائر القدرة a في مالا نهاية، وتؤول دوائر القدرة إلى خطوط متوازية، هي الخطوط التي تعطي المستويات المختلفة للقدرة الفعالة في مخطط الحمل الكهربائي، وتصبح دائرة القدرة $P_{e1} = 0$ هي خط معامل القدرة صفر، كما يؤول الخط ac' في شكل (١٧-٤ أ)، الذي يحدد النهايات للعظمى للقدرة الميكانيكية عند قيم تفييه مختلفة، إلى خط نهاية الاتزان، الذي يصبح موازياً للخط Oa ، خط معامل قدرة الوحدة في الحالتين.

مقاييس الرسم:

$$1 \text{ cm} = 50 \text{ V} = \frac{50}{5.1} = 9.8 \text{ A} = 8.5 \text{ KW}$$

$$ab = 13856 \text{ KW} = 1.63 \text{ cms} = 16 \text{ A} = I_a$$

$$= I_a Z_s = 81.5 \text{ V} = 1.63 \text{ cms}$$

$$V = \frac{500}{\sqrt{3}} = 288.5 \text{ V} = 5.77 \text{ ems} ,$$

$$n_s = 1500 \text{ r.p.m}$$

نحصل من مخطط الحمل الكهربائي في شكل (١٨ - ب) على المعلومات الآتية بالنسبة لنقطة التشغيل c ، التي تحددت بالمعلومات السابقة .

$$E_o = 225 \text{ V} , \quad \psi = 18^\circ , \quad \delta = 19^\circ$$

$$P_e = 3E_o I \cos \psi = 3 \times 225 \times 20 \times \cos 18 = 12840 \text{ W}$$

بتطبيق المعادلة (٢٢ - ٤) نحصل على عزم دوران المحرك الكلي ، حيث :

$$T_e = 0.973 \frac{12840}{1500} = 8.34 \text{ Kg.m}$$

ملحوظة : يمكن حساب P_{e1} ثم P_e من المعادلة (١١ - ٤) على النحو التالي :

$$P_{e1} = \frac{288.5}{5.1} [288.5 \cos 78^\circ 42' - 225 \cos (78^\circ 42' + 19^\circ)]$$

$$= 56.5 [56.5 + 27.4] = 4730 \text{ W}$$

$$P_e = 3 \times 4730 = 14190 \text{ w}$$

كما نحصل من المعادلة المقربة (١١ - ٤) على النتيجة :

$$P_e = 3 \times \frac{288.5 \times 225}{5.1} \cos 19 \approx 11900 \text{ w}$$

وتعزى الفروق في النتائج إلى مدى الدقة في الرسم ، والتقريب .

نظرا لأن تيار التنبيه لم يتغير في الحالة الثانية عن الحالة الأولى ، فإن نقطة التشغيل الثانية 'c' تقع على دائرة التنبيه E_o ، التي حصلنا عليها ، وتصبح قيمة 'IZ'

في الوقت نفسه عبارة عن $306 = 5.1 \times 60$ فولت ، ويمثل بالطول 6.1 سنتيمترا ابتداء من a (طول a/ يساوى 6.1 سم) تكون قيمة ϕ في هذه الحالة 35 درجة ، متأخر .

وتكون النتائج التي نحصل عليها كما يأتي :

$$\cos \phi = 0.8192 \text{ lagging} , \quad \psi = 36^\circ , \quad \delta = 70^\circ$$

$$P_e = 3 \times 225 \times 60 \times 0.809 = 32750 \text{ w}$$

$$T_e = 0.973 \frac{32750}{1500} = 21.207 \text{ Kg.m.}$$

خواص التشغيل للمحرك المتزامن :

نختتم هذا الباب بإيراد أهم خواص التشغيل للمحرك المتزامن ، وهي تلخص فيما يأتي :

١ - نظراً للعلاقة الخاصة القائمة بين تردد اليبفوع الذي يغذى المحرك ، وسرعة التزامنه ، التي يحددها عدد الأقطاب الثابت ، وهي $f = \frac{pn_s}{60}$ ، فإننا نستطيع أن نعتمد اعتماداً كلياً على أن المحرك سوف يدور بسرعة ثابتة تماماً ، إذا ظل تردد اليبفوع ثابتاً لا يتغير . هذا ونستطيع الحصول على سرعات متغيرة من المحرك في المدى الذي نستطيع تحديده لتغير تردد اليبفوع .

٢ - لما كان عزم الدوران الذي يعطيه المحرك ينشأ على أساس الترابط الذي يقوم بين مجموعة الأقطاب الرئيسية على العضو الدائر ، ومجموعة الأقطاب الدجال المغناطيسى الدائر ، الذي يؤول إليه التأثير المغناطيسى للمفات المنتج ، عندما تكون المجموعتان دائرتين بسرعة التزامن n ، فإن المحرك لا يمتلك عزم دوران

للبدء . معنى ذلك أنه عند توصيل أطراف العضو الثابت للمحرك إلى الينبوع ، والعضو الدائر لازال في حالة السكون ، فانه بصرف النظر عن تيار القهر الكبير الذى يمر فى ملفات العضو الثابت للمحرك فى هذه الحالة ، لا ينشأ عزم دوران يمكن أن يعمل على دوران المحرك . بل لابد من دوران العضو الدائر ، بأية وسيلة ، أولا حتى يصل إلى سرعة التزامن ، وعندئذ يمكن توصيل المحرك إلى الينبوع ، مع مرور تيار التنبيه فى ملفات التنبيه على العضو الدائر ، فيحدث الترابط على الفور بين مجموعة أقطاب المجال المغناطيسى الدائر ، الذى تنشئه ملفات المنتج عند توصيلها إلى الينبوع ، وبمجموعة الأقطاب الرئيسية التى تدور بسرعة التزامن ، فينتج عزم الدوران المطلوب ، المناظر للتيار والقوة الدافعة الكهربائية وسرعة التزامن الموجودة فى تلك اللحظة . ولكي يحدث الترابط بين مجموعتى الأقطاب ، فقد تنشأ إزاحة سريعة ومفاجئة لاحداهما ، بما يعادل خطوة قطبية تقريبا ، لحظة توصيل أطراف ملفات المنتج مع الينبوع ، حتى يصبح كل قطبين مختلفين من أقطاب المجموعتين دائرين معاً ، بما يحقق التجاذب ، ومن ثم الترابط ، بينهما طوال فترة التشغيل .

أما عند توصيل ملفات المنتج مع الينبوع ، والأقطاب الرئيسية على العضو الدائر فى حالة السكون ، فان كل قطب من أقطاب المجال المغناطيسى الدائر يحاول جذب القطب المخالف ، من أقطاب العضو الدائر الرئيسية ، الذى يتصادف مروره أمامه ، لحظة التوصيل ، مما يعطى العضو الدائر عزم دوران فى إتجاه دوران المجال الدائر . ولكن نظراً لعزم القصور الذاتى الكبير ، الذى يمتلكه العضو الدائر ، فانه قبل أن يدور ، يكون القطب المماثل ، من أقطاب المجال المغناطيسى الدائر ، قد جاء أمام نفس القطب من الأقطاب الرئيسية ، لى يتنافر معه ،

ويعطيه عزم دوران في الاتجاه المضاد ، فيظل ثابتاً بدون حركة .

توجد عدة طرق لبدء المحركات المتزامنة ، منها الطريقة التقليدية التى تتمثل فى عملية التزامن اللازم اجراؤها عند توصيل الآلة المتزامنة مع قضبان لانهائية . وفى طريقة أخرى يدار المحرك بمحرك تأثيرى صغير ، حتى يصل به إلى سرعة التزامن تقريبا ، حيث يمكن أن يحدث الترابط بين أقطاب المجال المغناطيسى الدائر والافطاب الرئيسية . كما توجد وسائل أخرى يستلزم شرحها أن نكون على علم بنظريات المحركات التأثيرية . لذلك سنرجى شرح هذا الموضوع حتى نصبح ملين بخواص تشغيل هذا النوع من المحركات .

٣ — يمكن عن طريق تغيير تيار تذييه المحرك التحكم فى معامل القدرة فى حدود واسعة ، سواء كان متقدما أو متأخرا . وهذا بخلاف المحركات الأخرى ، مثل المحرك التأثيرى ، الذى لا يمكن تغيير معامل قدرته إلا باستخدام أجهزة إضافية .

مسائل على الباب الرابع

- 1 — Two identical delta connected alternators, mechanically coupled to one prime mover, have each an armature resistance and synchronous reactance per phase of 0.3Ω and 4Ω respectively, and their induced electromotive forces are in phase. The machines are connected in parallel and the field excitations are so adjusted that the armatures develop 250 V and 350 V per phase respectively. Find (a) the circulating armature current, (b) the terminal voltage (c) the electrical output of the generating machine, and (d) the power supplied

by the prime mover if the mechanical and core losses total 2 KW

- 2 — A 5000 K V A, 50 cycle alternator running at 1500 rev. per min in parallel with other machines, has a generated electromotive force of 10000 V. Its synchronous reactance is 20%. Find for (a) no load (b) full load at power factor 0.8 lagging, the synchronising power per unit mechanical angle of phase displacement, and calculate the synchronising torque if the mechanical displacement is 0.5°
- 3 — A 10000 K V A, 3 phase alternator has an equivalent short circuit reactance of 20%. Calculate the synchronizing power of the armature per mechanical degree of phase displacement when running in parallel on 10000 V, 50 cycle bus-bars at 1500 rev-per min.
- 4 — A 2000KVA, 3 phase, 8 pole alternator runs at 750 rev. per min in parallel with other machines on 6000 V bus bars. Find the synchronizing power per mechanical degree of displacement and the corresponding synchronizing torque. The synchronous reactance of the machine is 20%.
- 5 — Two alternators working in parallel supply a lighting load of 3000 KW and a motor load aggregating 5000 KW at a power factor of 0.71. One machine is loaded to 5000 KW at power factor 0.8 lagging. What is the load and power factor of the other machine ?
- 6 — Two alternators running in parallel supply the follo-

wing loads :

1000 KW at power factor 0.9 lagging

800 KW at power factor 0.8 lagging

500 KW at power factor unity

500 KW at power factor 0.9 leading

The load on one machine is adjusted to 1500 KW at power factor 0.95 lagging. Find the load and power factor of the other machine.

- 7 — Two identical 3-phase, star-connected generators operating in parallel, share equally a total load of 750 KW at 6000 V and power factor 0.8. The synchronous reactance and resistance of each machine are respectively $50\ \Omega$ and $2.5\ \Omega$ per phase. The field of the first generator is excited so that the armature current is 40 A (lagging). Find (a) the armature current of the second alternator : (b) the power factor of each machine (c) the electromotive force of each machine.
- 8 — An alternator of 1500 KVA capacity runs in parallel with one of 1000 KVA capacity. What load should each supply and at what power factor should each operate in order that the currents and power outputs shall be proportional to their ratings if the combined load is 2000 KW at 0.8 power factor ?
- 9 — Two identical 2000 KVA alternators operate in parallel. The governor of the first machine is such that the frequency drops uniformly from 50 c/s on no load to 48 c/s on full load. The corresponding uniform speed drop of the second machine is 50 to

- 47.5 c/s. (a) How will the two machines share a load of 3000 KVA, and what is the corresponding frequency ? (b) What is the maximum load at unity power factor that can be delivered without overloading either machine ?
- 10 — Two 3 phase synchronous alternators have the same number of poles and are mechanically coupled to the same shaft. They operate in parallel on a common load. Determine, for each machine, the KW output and power factor under the following conditions : Synchronous impedance of each alternator is $0.2 + j2.0$ ohms per phase. Equivalent impedance of the load is $3 + j4$ ohms per phase. Induced e.m.f. per phase is $2000 + j0$ volts for machine (I) and $2200 + j100$ volts for machine (II).
- 11 — A 10000 KVA, single phase alternator has a synchronous impedance of 10 ohms and a resistance of 1 ohm, and operates in parallel with constant voltage 10000 V bus-bars. Calculate :—
(a) the maximum external load that the machine can supply before dropping out of step when the machine is excited to give an E.M.F. of 11000 V.
(b) the armature current and power factor corresponding to this maximum load.
- 12 — Explain, with the aid of vector diagrams, the change in the armature current of a synchronous generator which is connected to infinite bus-bars, (a) when the steam admission is changed and the excitation is kept constant ; (b) when the excitation is

varied and the output power is constant.

A 3-phase, star connected synchronous generator has an armature resistance of 1.0 ohm and a synchronous reactance of 12.5 ohms. It is connected to 11000 V infinite bus-bars to which it delivers a current of 300 amps at 0.8 power factor lagging. If the excitation is kept constant and the steam admission is increased by 40%, find the corresponding values of the machine current and power factor. If the steam admission is kept constant at the new value and the excitation is adjusted until the E.M.F. per phase becomes 7600 V, find the new value of the current and power factor.

- 13 — How can the active and reactive powers, delivered by a synchronous generator to infinite bus-bars, be changed ?

A 3 phase, star connected synchronous generator has an effective resistance and synchronous reactance per phase of 0.75 ohms and 10 ohms respectively. It is connected to 6600 V, 50 c/s infinite bus-bars to which it delivers 2500 KW. When the induced line E.M.F. is adjusted to 9000 V, find the line current and power factor.

- 14 — A 3 phase, star connected alternator, having a synchronous reactance of 25 ohms and negligible armature resistance, delivers a current of 84 amps. at unity power factor to a 11000 volt infinite bus bars. If the steam admission be unchanged and the E.M.F. raised by 25%, determine graphically the new value of machine current and power factor.

If this higher value of excitation was kept constant and the steam supply gradually increased, at what power output would the alternator break from synchronism? Find also the current and the power factor to which this maximum load corresponds.

- 15 — A 3 phase, 1500 KVA, star connected alternator is delivering its full load to a 6600 V infinite bus-bars at 0.8 power factor lagging. The armature has a synchronous reactance of 8 ohms and a resistance of 0.5 ohm. Explain, with the aid of a load diagram drawn to scale, what the station operator would do if he were asked to make the machine fulfill the following operating conditions :

- (a) Supply 1600 KW to the bus-bars without changing the excitation.
- (b) Adjust the power factor to unity with the same active power as in (a).
- (c) Supply 2000 KW at a power factor of 0.8 leading to the bus-bars.

Find the values of the machine current and E. M. F. in each case.

What is the value of the maximum power the machine would deliver just before breaking out of synchronism in case (c) ?

- 16 — A 3 phase, 2000 KVA, star connected alternator is delivering its full load to a 6600 V infinite bus-bars at 0.8 power factor lagging. The armature has a synchronous reactance of 10 ohms and a resistance of 0.66 ohm. Explain what the station operator would

do if he were asked to make the machine fulfill the following operating conditions :

- (a) Supply 2000 KW to the bus-bars without changing the excitation.
- (b) Adjust the power factor to unity with the same active power as in (a).
- (c) Supply 2500 KW at a power factor of 0.9 leading to the bus-bars.

Find the values of the machine current and E.M.F. in each case.

17 — A 6600 volts, 3-phase, star connected, 50 C/S, 1500 RPM alternator is connected in parallel with the bus bars, and the steam supply is increased till the output equals 10000 KW. When the field current is adjusted to give a line EMF of 7700 volts, the power factor of the machine becomes 0.8 lagging. Calculate :

- (a) The synchronous reactance of the machine, neglecting its resistance.
- (b) The maximum external load the machine can supply before dropping out of step for the same above excitation.
- (c) The armature current and the power factor corresponding to this maximum load.

18 — Describe the procedure of preparing a synchronous generator and connecting it to infinite bus-bars to take a certain share of the load at a certain power factor.

A 3 phase, star connected synchronous motor is supplied from 660 V infinite bus-bars and takes an input

of 1500 KW, when its induced E.M.F per phase is adjusted to 5000 V. If the motor resistance and synchronous reactance per phase are 0.4 ohm and 5 ohms respectively, find the line current and power factor.

- 19 — A 6600 V, star connected, 3 phase synchronous motor works at constant voltage and constant frequency. The effective resistance and synchronous reactance per phase are respectively 2 ohms and 20 ohms. The excitation is adjusted so that when the input is 1000KW the power factor is 0.8 leading.

(a) With above excitation remaining constant, find the power factor of the motor when the input is increased to 1400 KW.

(b) If it is desired to operate the motor at unity power factor with an input of 1500 KW, find the necessary generated E.M.F. per phase.

- 20 — A synchronous generator, which is synchronised and connected to 11000 V, 50 c/s infinite busbars, has to supply 3750 KW at 0.8 power factor lagging. It has a synchronous reactance of 12 ohms and an armature resistance of 1.0 ohm. Explain, with the aid of a load diagram, how the station operator would proceed to make the machine deliver the required load to the busbars and find the value of the machine E.M.F. in this case. Find the percentage change in the excitation necessary to make the machine deliver the same load at 0.8 power factor leading. For this new value of excitation, find the maximum power and the corresponding current and power factor which the machine

should deliver to the busbars before it breaks out of synchronism.

- 21 — A 3 phase, star connected alternator has a synchronous reactance of 10 ohms per phase and negligible armature resistance. It delivers a load of 1200 KW at 0.8 power factor lagging to 6600 V infinite busbars. If the steam admission be unchanged and the e. m. f. raised by 20%, determine the new value of the machine current and power factor. If the new value of the excitation were kept constant and the steam supply increased gradually until the machine delivers 1800KW, find the corresponding values of the machine current and power factor. Find also the power output at which the alternator would break from synchronism for the same value of excitation.
- 22 — A 3 phase, star connected alternator, having a synchronous reactance of 20 ohms and 2 Ω armature resistance, delivers a current of 100 amps. at unity power factor to a 11000 volt infinite bus bars. If the steam admission be unchanged and the E. M. F. raised by 35%, determine graphically the new value of machine current and power factor. If this higher value of excitation was kept constant and the steam supply gradually increased, at what output would the alternator break from synchronism. Find also the current and the power factor to which this maximum load corresponds.
- 23 — A 3 phase, star connected alternator has a synchronous reactance of 17 ohms and an armature resistance

of 1.0 ohm. It is connected to an 11000 V infinite busbare to which it delivers a full load current of 140 amps at 0.8 power factor lagging. If the steam admission is kept constant and the E. M. F. of the alternator is increased by 30%, find the new value of the machine current and power factor. If the new value of the excitation were kept constant and the steam admission is increased gradually until the machine delivers 2800 KW, find the corresponding value of the machine current and power factor. Find also the power output at which the alternator will break from synchronism.

- 24 — The following data relate to a 275 KW, 3 phase, 6600 V, star connected, non-salient type alternator :

Voltage on open circuit	5600	6600	7240	8100
Exciting amperes	46.5	58	67.5	96

Short circuit stator current of 35 amps was obtained with an exciting current of 15 amps. Armature resistance drop on full load is 2%.

(a) Calculate the exciting current for full load operation at a power factor of 0.8 lagging.

(b) If this exciting current is kept constant, while the alternator is operating on constant voltage and frequency bus bars, find the load power which the machine gives at unity power factor.

- 25 — A 3 phase, star connected alternator has a synchronous reactance of 20 ohms and an armature resistance of 1.0 ohm. It is connected to an 11000 V infinite bus bars to which it delivers a full load current of

120 amps at 0.8 power factor lagging. If the steam admission is kept constant and the E. M. F. of the alternator is increased by 25%, find the new value of the machine current and power factor. If the new value of the excitation were kept constant and the steam admission is increased gradually until the machine delivers 2500 KW., find the corresponding values of the machine current and power factor. Find also the power output at which the alternator would break from synchronism.

- 26 — Describe the procedure of preparing a synchronous generator and connecting it to infinite bus-bars to take a certain share of the load at a certain power factor.

A 3 phase, star connected synchronous motor is supplied from 6600 V infinite bus-bars and takes an input of 1500 KW, when its induced E. M. F. per phase is adjusted to 5000 V. If the motor resistance and synchronous reactance per phase are 0.4 ohm and 5 ohms respectively, find the line current and power factor.

- 27 — What is the H.P output corresponding to maximum input of a 3 phase, mesh connected, 250 V, 20 H.P synchronous motor when the generated E.M.F. is 320 V ? The effective resistance and synchronous reactance per phase are 0.9 ohm and 4.5 ohms respectively. The friction, windage, iron and excitation losses total 800 watts and are assumed to remain constant.

If the machine is delivering full load power at the above excitation, find:—

- (a) the line current.
- (b) the power factor.
- (c) the efficiency.

28 — A 3 phase, star connected synchronous motor, having a synchronous impedance of $0.25 + j1.25$ ohms per phase is connected to an 1100 V system. The machine is excited to give an induced line E.M.F. of 1500 V. Find :—

- (a) the line current and power factor when the motor is delivering a net output of 850 H.P.
- (b) the maximum H.P. output.
- (c) the output H.P. corresponding to maximum input.

The iron and friction losses amount to 35 KW and are assumed constant.

29 — A 200 V, 3 phase mesh connected synchronous motor has a resistance and synchronous reactance of 1 and 6 ohms per phase respectively. Find (a) the maximum mechanical power in watts delivered to the shaft corresponding to an induced E.M.F. of 180V; (b) the E.M.F. to produce the same previous power at unity power factor and the value of the line current (c) the absolute maximum power delivered to the shaft and the corresponding E.M.F., Electrical input and the efficiency.

الباب الخامس

التأرجح والاتزان في الآلات المتزامنة

(Hunting and stability of synchronous machines)

ظاهرة التأرجح (أو التذبذب) :

Hunting or oscillation phenomena :

سبق أن ذكرنا أن الترابط بين مجموعة الأقطاب الرئيسية على العضو الدائر للآلة المتزامنة ، وبين مجموعة الأقطاب المزعومة للجال المغناطيسى الدائر الناشئ عن رد فعل ملفات المنتج ، يكون عن طريق خطوط القوى للجال المغناطيسى المحصل في الثغرة الهوائية ، التى تخرج من قطب في إحدى المجموعتين ، وتدخل في القطب المخالف المترابط معه من المجموعة الأخرى ، عمودية على سطح القطب فى الناحيتين . وعندما تكون الآلة موصلة على قضبان لانهاية تكون هذه الخطوط ذات طبيعة مرنة ، تشبه فى تكوينها خيوط من المطاط ، تربط العضو الدائر ، وهو فى حالة التزامن التى يدور عليها ، بالشبكة الكهربائية ذات القدره الانهاية . فاذا حدث ما يحاول الاخلال بهذا التزامن ، سرت من الشبكة ، أو اليها ، قدرة التزامن التى تعمل على إعادة الأمور إلى نصابها الصحيح . ومن الواضح أن قدرة التزامن هذه يمكن تواجدها أيضا عندما يكون المولد عاملا على التوازي مع مولد آخر ، كما سبق شرحه فى الباب الرابع ، ولكنها لا تظهر فى حالة عمل المولد على حمل ميت منفصل (isolated dead load) ، كأن يغذى بمفرده حملا يتكون من المصابيح ، والأفران مثلا .

تكون خطوط القوى المغناطيسية ، التي شبهناها بخيوط مرنة من المطاط ، في حالة توصيل الآلة على قضبان لانهائية ، ممسكة من ناحية أقطاب المجال المغناطيسى الدائر ، الذى يرتبط وجوده بهذه القضبان ، بالقدرة اللانهائية للشبكة الكهربائية التى تدخل فيها القضبان ، بينما يكون ممسكا بها من ناحية الاقطاب الرئيسية كل عزم القصور الذاتى للكتل الموجودة على عمود لإدارة الآلة بأكملها . وتشبه المجموعة ، فى هذه الحالة ، كتلة ذات وزن معين ، وبالتالي قصور ذاتى معين ، معلقة بوساطة خيط مرن فى قائم يستطيع أن يتحمل قوى جذب وشد بأى مقدار . ويشبه وضع الكتلة ، وهى فى حالة اتزان تحت تأثير وزنها وقوة الشد المضادة ، الناشئة عن استطالة الخيط بقدر معين يتوقف على هذا الوزن ، وضع الآلة المتزامنة ، وهى تدور بالسرعة المتزامنة ، فى حالة اتزان تام ، تحت تأثير عزمى الدوران الناشئين عن قدرة المجال المغناطيسى الدائر ، والقدرة المحركة (فى حالة المولد) ، أو رد فعل الحمل (فى حالة المحرك) ، على عمود الإدارة .

وكما أن الكتلة ، المعلقة من خيط مرن ، تهتز بتردد طبيعى (natural frequency of oscillation) ، عندما يحدث طارئ عابر يخل بهذا الاتزان ، ثم تعود فى النهاية إلى وضع الاتزان الاصلى (مالم تخرج عن حدوده فى خلال الاهتزاز) ، فإن الآلة المتزامنة تتعرض لحالة مماثلة من الاهتزاز ، ويكون لها تردد اهتزاز طبيعى ، عند حدوث ما يخل بحالة التوازن التى تدور عليها ، بحيث تعود فى النهاية إلى حالة التوازن الاصلية (مالم تخرج عن حدوده) . ومن الطبيعى أننا نفترض وجود عوامل تساعد على اخماد الذبذبات فى الحالاتين . هذا ويكون الاهتزاز فى الآلة المتزامنة على شكل زيادة ونقص

متتابعين في سرعه الزمان ، التى يجب أن تظل ثابتة . ويرتقب على ذلك تغير ترددى في زاوية الحمل δ ، وبالتالي تغير في عزم الدوران والقوة ، التى يعطيها المولد للقضبان ، أو عزم الدوران والقوة ، التى يأخذها المحرك من هذه للقضبان .

التردد الطبيعى للتأرجح (Natural frequency of hunting) :

عندما يطرأ ما يؤدى إلى إحداث خلل لحظى في توازن العوامل المؤثرة على الآلة ، وهى في حالة التوازن الثابتة ، ثم يختفى العامل المؤثر بعد إشاعة الاضطراب مباشرة ، فإن الآلة تواصل الاهتزاز ، حتى يتم إخماده . وفي هذه الحالة يكون تردد الاهتزاز هو التردد الطبيعى للمجموعة ، وهو يتوقف على طبيعة تكوينها ، ولا علاقة له بالعامل الذى تسبب في حدوث الاهتزازات . وب تطبيق ذلك على الجسم المعلق بخيط مرن ، الذى شبهنا به المجموعة ، نستطيع أن نقول إننا عندما نؤثر على الجسم بقوة لحظية ، ننقله من مكانه ، ثم نتركه ، كأن تشده قليلا إلى أسفل ، ثم نتركه ، فإن الجسم يهتز بالتردد الطبيعى للمجموعة ، كما سبق لك دراسته فى علم الميكانيكا . ولا يدخل فى حساب التردد أى شئ يتعلق بالقوة التى تسببت فى وجود الاهتزازات

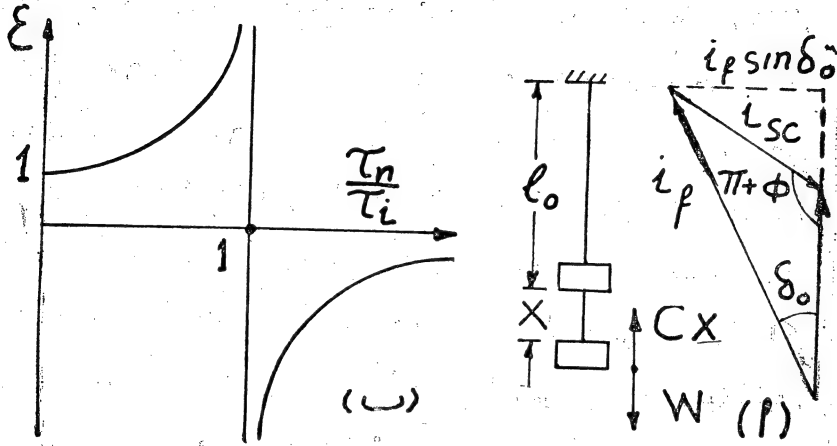
والأسباب التى تؤدى إلى حدوث اهتزازات بالتردد الطبيعى ، على هذا النحو ، كثيرة ، منها عدم دقة ضبط المنظم ، ثم تلافى الأمر فى الحال . وكذلك عمل الترامن فى وضع غير صحيح . ثم إصلاح الأمر على الفور . وكذلك التغيرات المفاجئة فى الحمل . واخفاق الاشتعال (misfire) فى إحدى الاسطوانات فى آلة الاحتراق الداخلى . أو أى اضطراب لحظى فى سير الأمور ، ثم اختفاء العامل الذى أدى إلى حدوث هذا الاضطراب على الفور . هذا الاضطراب يؤدى إلى

حدوث اختلال في التوازن بين عزم الدوران المحرك ، وعزم الدوران المضاد ،
فينشأ عزم دوران معجل (accelerating torque) يزيد السرعة ، وبالتالي
يزيد الزاوية δ ، أو عزم دوران مقصر (retarding torque) ينقص السرعة
وبالتالي ينقص الزاوية δ . وسوف نطبق فيما يلي هذه الأفكار ، مع فرض بعض
الفروض التي تسهل الحل ، لكي نحصل على قيمة تقريبية للتردد الطبيعي للاهتزازات ،
وأهم هذه الفروض أن الآلة توربينية ، فنهمل تأثير عزم دوران التخميد (الذي
يعمل على اخماد الاهتزازات في أقل مدة ممكنة) على معادلة الحركة ، وذلك لكي
نحصل على معادلة تفاضلية سهل الحل ، يمكن بحلها الحصول على قيمة تقريبية للتردد
الطبيعي للاهتزازات . فإذا فرضنا أن :

M هو عزم القصور الذاتي للكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك ، كجم .
متر . ثانية^٢ . T_d هو عزم الدوران المحرك ، وهو متوسط قيمة عزم الدوران
الثابت للآلة المحركة ، كجم . متر . T_e هو عزم الدوران المضاد الذي ينشأ من
المجال المغناطيسي الدائر على أقطاب العضو الدائر (حالة المولد) ، كجم . متر .
 δ_{om} زاوية الحمل بالوحدات نصف القطرية الميكانيكية (mehanical radians)
 ω_{om} السرعة الزاوية عند التزامن للعضو الدائر ، بالوحدات نصف القطرية
الميكانيكية في الثانية .

هذا وسوف نفترض أيضا أن R_a أصغر كثيرا من X_s بحيث يمكن إهمال R_a
واعتبار أن $\theta = \frac{\pi}{2}$ ، $Z_s = X_s$ ، كما نفترض أيضا أن $\psi \ll \phi$.
يبين شكل (١ - ٥) ، على الأسس السابقة ، مخطط متجهات المولد باعتبار أن
 i_f هو تيار التنبيه اللازم لتوليد القوة الدافعة الكهربائية E_o و i_{sc} هو تيار التنبيه
اللازم لتزير تيار الحمل الكامل عندما تكون أطراف الآلة مقصورة ، في اختبار

دائرة القصر . ويتضح من الشكل أن $\cos \psi \cong \cos \phi = \frac{i_f \sin \delta_o}{i_{sc}}$



شكل (١ - ٥)

لكي نحصل على المعادلة التفاضلية التي تعطينا التردد الطبيعي للاهتزازات ، سوف نعتبر أن عزم الدوران المحرك ثابت ، وينظر زاوية الحمل ، بالوحدات نصف القطرية الكهربائية (electrical radians) δ_o . وعندما تكون الاحوال طبيعية فإن عزم الدوران المحرك هذا (عزم الدوران الميكانيكي T_d في حالة المولد) يساوى عزم الدوران المضاد (عزم الدوران الكهربائي T_{eo}) الناشئ عن رد فعل المنتج) ، أى أن $T_d = T_{eo}$.

نفرض أنه بسبب أى عامل وبقى (يؤثر ثم يزول حالا) حدث الاختلال بحيث تتغير الزاوية δ_o فجأة إلى $(\delta = \delta_o + \beta)$ ، وتكون β زاوية صغيرة جدا ، في حين أن عزم الدوران المحرك T_d يظل ثابتا . سوف يصبح عزم الدوران المضاد الكهربائي T_e في هذه الحالة مناظراً للزاوية الجديدة δ ، ويؤثر الفرق بين عزمي الدوران ، المضاد والمحرك ، على مجموعة الاجزاء الدائرة في

الآلة ، فنحدث الاهتزازات ، التي تحكمها المعادلة التفاضلية الآتية :

$$M \frac{d\omega_m}{dt} = T_d - T_e \dots\dots (٥-١)$$

حيث ω_m هي السرعة الزاوية للعضو الدائر المناظرة للزاوية الجديدة δ .
هذا ويكون عزم الدوران المحرك مساويا لعزم الدوران الكهربائي المضاد قبل حدوث الاختلال ، عندما كانت الآلة تدور بسرعة التزامن ، أى عزم الدوران الكهربائي T_{eo} المناظر للزاوية δ_o . لذلك نجد أن :

$$T_d = T_{eo} = 3 E_o I \cos \psi \times \frac{1}{2\pi n_s} \approx \frac{3 E_o I \cos \phi}{\omega_o} \dots (٥-٢)$$

(قدرة المخرج بالكيلو فولت أمبير)

$$P_a = \text{KVA output}$$

$$T_a = 973 \frac{P_a}{n} , \quad \cos \phi \approx \frac{i_f \sin \delta_o}{i_{sc}} , \quad \eta \text{ معامل الجودة}$$

بالتعويض في المعادلة (٥-٢) بهذه القيم :

$$T_d = \frac{3 E_o I}{\omega_o} \times \frac{i_f \sin \delta_o}{i_{sc}} \quad \text{جول}$$

$$= \frac{973}{n_s} \cdot \frac{P_a}{\eta} \cdot \frac{i_f \sin \delta_o}{i_{sc}}$$

$$= T_a \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \sin \delta_o \text{ Kg. m. } \dots\dots (٥-٣)$$

نحصل على عزم الدوران المضاد T_e ، بالتعويض بالزاوية $\delta_o + \beta$ بدلا من δ_o في المعادلة (٥-٣) ، مع اعتبار β زاوية صغيرة ، بحيث يكون $\sin \beta \approx \beta$ ، $\cos \beta \approx 1$ ، كما يأتي :

$$T_e = \frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \sin(\delta_o + \beta)$$

$$\approx \frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i} [\sin \delta_o + \beta \cos \delta_o] \dots (٥-٤)$$

بالتعويض بقيمة كل من T_e و T_d من المعادلتين (٥-٢) ، (٥-٤) في المعادلة (٥-١) :

$$M \frac{d\omega_m}{dt} = - \frac{T_a}{\eta} \frac{i_f}{i_{sc}} \beta \cos \delta_o \dots \dots (٥-٥)$$

إن ω_m الواردة في المعادلة (٥-٥) هي عبارة عن مجموع سرعة الزمان من الزاوية ω_{om} ومعدل تغير الزاوية δ_m (بالوحدات نصف القطرية الميكانيكية في الثانية) حيث :

$$\delta_m = \frac{\delta}{p} = \frac{\delta_o + \beta}{p} ,$$

$$\omega_m = \omega_{om} + \frac{1}{p} \frac{d\beta}{dt}$$

$$\therefore \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{p} \frac{d^2\beta}{dt^2} (\omega_{om} \text{ constant}) \dots \dots (٥-٦)$$

بالتعويض من (٥-٦) في (٥-٥) نجد أن :

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} + \frac{\cos \delta_o}{\eta} \cdot \frac{p T_a}{M} \cdot \frac{i_f}{i} \cdot \beta = 0 \dots \dots (٥-٧)$$

وهذه معادلة تفاضلية لحركة اهتزازية بسيطة ذات شكل جيبى على نمط

المعادلة $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_n^2 x = 0$. وتكون قيمة السرعة الزاوية ω_n ، المناظرة

للتردد الطبيعي للاهتزازات الحرة (free oscillations) ، كما جاءت في المعادلة

(٥-٧) هي :

$$\omega_n^2 = \frac{p T_a}{M} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \cdot \frac{\cos \delta_o}{\eta} \dots \dots (٥-٨)$$

يمكننا أن نعتبر أن قيمة $\frac{\cos \delta_o}{\eta}$ تساوى واحد تقريبا ، كذلك يمكننا تعريض ما نسميه بعزم الخدافة (fly - wheel moment) ، الذى نرمز اليه بالقيمة $\frac{GD^2}{4g}$ ، وهو يكافئ M ، حيث تعطى القيمة GD^2 عادة مع بيانات تصميم الآلة ، فيكون من الأنسب إستخدامها فى المعادلات بدلا من M .

$$M = \frac{G D^2}{4 g} , \quad g = 9.81 \text{ m/sec}^2 , \quad G \text{ Kg.} , \quad D \text{ metres.}$$

$$\therefore \omega_n^2 = \frac{P_a p^2}{2\pi f} \cdot \frac{1000}{9.81} \cdot \frac{4 \times 9.81}{GD^2} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \dots \dots (٥-٩)$$

بذلك نحصل على زمن الذبذبة الحرة τ_n بالثانية (period of free oscillation)

$$\tau_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi \sqrt{\frac{2\pi f GD^2}{p^2 P_a \times 4000} \cdot \frac{i_{sc}}{i_f}}$$

$$\tau_n = \frac{n_s}{241} \sqrt{\frac{GD^2}{f P_a} \cdot \frac{i_{sc}}{i_f}} \text{ ثانية} \dots \dots \dots (٥-١٠)$$

تعطى المعادلة (٥-١٠) زمن الذبذبة الحرة لتأرجح الآلة بدلالة بيانات التصميم المتاحة عادة . ويطلق على النسبة $\frac{i_{sc}}{i_f}$ اسم ——— نسبة دائرة القصر (short circuit ratio) . ولكن المعادلة بشكلها الراهن مع ذلك لا تعطى فكرة واضحة عن العوامل الحقيقية ، التى يمكن بتغييرها التأثير على قيمة زمن الذبذبة . وأهم هذه العوامل الفيض المغناطيسى فى الثغرة الهوائية للآلة ، وقد بينا

شرح العملية بأكملها على مرونة خطوط هذا الفيض ، مع تشديدها بخيوط مرنة .
لتلاني ذلك نقوم بعمل تعديل في شكل المعادلة ، لكي يظهر فيها تأثير الفيض
المغناطيسى ، كما يأتي :

سوف نبين في باب تصميم الآلات المتزامنة ، بطريقة مماثلة لتلك التي اتبعناها
في تصميم آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربائية ، صفحة ٥٤٠ المعادلة
(١٢-٣)) أن $\frac{P_a}{n_s}$ ترتبط بالبعدين الرئيسيين للآلة D و I_1 ، وهما اللذان
نعتبرهما ثابتان على النحو التالي :

$$\begin{aligned} \frac{P_a}{n_s} &= K \cdot A \cdot C \cdot B \cdot D^2 \cdot I_1 \\ &= K \cdot \frac{IZ}{\pi D} \cdot \frac{\pi D I_1 B}{\pi} \cdot D \quad (K \approx 0.185 \times 10^{-11} \text{ k}_{\omega}) \\ &= K_1 \cdot \phi_t \cdot IZ \left(K_1 = \frac{K}{\pi^2} \right) \dots\dots (٥-١٢) \end{aligned}$$

بالتعويض من المعادلة (٥-١١) في المعادلة (٥-١٠) نحصل على زمن
الذبذبة الحرة مرة أخرى بالشكل الجديد المطلوب .

$$\begin{aligned} \tau_n &= 2\pi \sqrt{\frac{2\pi}{60p} \cdot \frac{GD^2}{4000} \cdot \frac{1}{K_1 \phi_t IZ} \cdot \frac{i_{sc}}{i_f}} \\ &= \frac{0.102}{\sqrt{K}} \sqrt{\frac{GD^2}{p \phi_t IZ} \cdot \frac{i_{sc}}{i_f}} \\ &= 7.54 \times 10^6 \sqrt{\frac{GD^2}{k_{\omega} p \phi_t IZ} \cdot \frac{i_{sc}}{i_f}} \dots\dots (٥-١٣) \end{aligned}$$

يتبين لنا من المعادلة (٥-١٣) أن زمن الذبذبة الحرة (أو الطبيعية)

يتناسب عكسياً مع كل من الحمل المغناطيسى الكلى للآلة ، أو عدد خطوط القوى المغناطيسية الكلى فى الثغرة الهوائية للآلة ϕ ، والحمل الكهربائى ، أو عدد الاربعة موصلات الكلى فى مجارى المنتج (صفحة ٥٣٨ و ٥٣٠ هندسة الآلات الكهربائية) ، كما أنه يتناسب عكسياً أيضاً مع تيار التثبيته i . وهذا يعطى صورة حقيقية للعوامل المؤثرة على الاهتزازات الحرة ، على هدى تمثيلها بالجسم المعلق من خيط مرن . هذا ونستطيع فى الواقع الاعتماد على التماثل الكامل بين الحالتين ، وخضوعها لمعادلة تفاضلية نمطية ، للحصول على زمن الذبذبة الحرة بطريقة سهلة ، كما يأتى :
إذا فرضنا ، بالنسبة لحالة الجسم المعلق فى خيط مرن أن وزنه W كجم ، وأن قوة الشد فى الخيط لكل متر استطالة هى C كجم ، وعجلة الجاذبية الأرضية $g = 9.81$ متر لكل ثانية^٢ ، نجد أنه فى وضع الاتزان الاصلى ، عندما تكون قيمة الاستطالة فى الخيط تساوى x متراً ، تتساوى W مع Cx . وعندما يطرأ أى اختلال فى حالة الاتزان ، وتحدث الاهتزازات الحرة ، تكون المعادلة التفاضلية التى تحكم الحركة هى :

$$\frac{W}{g} \frac{d^2 x}{dt^2} + Cx = 0 ,$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{Cg}{W} x = 0$$

$$\omega_n^2 = \frac{Cg}{W} , \quad \tau_n = 2\pi \sqrt{\frac{W}{Cg}} \dots (١٢-٥)$$

بالنسبة للآلة المتزامنة وهى فى حالة الاتزان ، عندما تكون دائرة بسرعة التزامن ، يكون الاتزان ناشئاً عن تعادل عزم الدوران المحرك T_d ، الذى يناظر الثقل W فى الحالة الأخرى ، مع عزم الدوران المضاد T_e ، الذى يناظر القوة الناشئة عن استطالة الخيط Cx . وهذا وتكون زاوية الحمل δ_m (بالوحدات

الميكانيكية (مناظرة للاستطالة x في الحيط المرن . فإذا اعتبرنا أن عزم الدوران المحرك يظل ثابتاً عند المقدار T_e ، فإن القيمة المناظرة للثابت C تكون عبارة عن عزم الدوران عند الحمل الكامل لكل وحدة من الزاوية δ_m ، أى $\frac{T_e}{\delta_m}$ (بالوحدات نصف القطرية الميكانيكية) . ويرمز للنسبة $\frac{T_e}{\delta_m}$ بالرمز T_s ، ويطلق عليها اسم عزم دوران التزامن ، حيث أن عزم الدوران T_s يشبه في طبيعته ، في هذه الحالة ، عزم الدوران الناشئ عن قدرة التزامن P_s ، التي سبق الحديث عنها في الباب الرابع . ومن الواضح أن عزم القصور الذاتي بالوحدات العملية M يلعب نفس الدور الذى تلعبه الكتلة $\frac{W}{g}$ ، فنجد بالقياس على المعادلة (١٣) — (٥) ، بالنسبة للآلة المتزامنة ، أن زمن الذبذبة عبارة عن :

$$\tau_n = 2\pi \sqrt{\frac{M}{T_s}} \quad \dots \quad \text{ثانية} \quad (٥-١٤)$$

تكون قيمة τ_n في حدود نصف ثانية إلى ثانية واحدة . وهذا ونظراً لأن عزم القصور الذاتي للآلة الكهربائية يتراوح في قيمته بين 1 إلى 10^{12} ، فإننا نحب أن نستعاض عن عزم القصور الذاتي ، أو GD^2 في المعادلات السابقة ، بحمل عليها ، ويحتوى بدلاً من ذلك على مقدار ليس فيه هذا التفاوت الضخم بالنسبة للآلات المختلفة . ونستخدم في هذه الحالة ما يسمى بثابت الزمن الميكانيكى للآلة (mechanical time-constant) ، وهو عبارة عن الزمن الذى يستغرقه عزم دوران الحمل الكامل للآلة T_d ، لى يصل بها من حالة السكون إلى سرعة التزامن n_s ، على أن يظل ثابتاً طوال فترة التعتيل . وبناء على هذا التعريف لثابت الزمن الميكانيكى θ_m نجد أن :

$$1.1 \quad \frac{d\omega}{dt} = T_d = \text{constant ثابت} ,$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_o}{\theta_m} = \text{constant ثابت}$$

$$\therefore M \frac{\omega_o}{\theta_m} = T_d , \quad \theta_m = \omega_o \frac{M}{T_d} \text{ ثانية (٥-١٥)}$$

بالتعويض في (٥-١٥) عن M , ω_o , T_d بما يساويها ، نجد أن :

$$M = \frac{G D^2}{4 g} , \quad \omega_o = \frac{2 \pi n_s}{60} ,$$

$$T_d = \frac{973}{n_s} \cdot \frac{P_a}{\eta} \cdot \cos \phi = \frac{973}{n_s} P_i$$

$$\theta_m = \frac{G D^2}{375} \frac{n_o}{T_d} = \frac{G D^2}{36.5} \cdot \left(\frac{n_o}{100} \right)^2 \cdot \frac{1}{P_i} \text{ ثانية (٥-١٦)}$$

حيث تكون قدرة المدخل بالكيلووات :

$$P_i = \frac{P_a}{\eta} \cos \phi$$

فاذا اعتبرنا $\frac{\cos \phi}{\eta}$ يساوى واحد تقريبا ، نجد أن :

$$\theta_m \approx \frac{G D^2}{36.5} \cdot \left(\frac{n_o}{100} \right)^2 \cdot \frac{1}{P_a} \text{ ثانية } \dots \dots \dots (٥-١٧)$$

بالتعويض عن P_a في المعادلة (٥-١٠) بدلالة θ_m من المعادلة (٥-١٧) :

$$\tau_n \approx 25 \sqrt{\frac{\theta_m}{f} \cdot \frac{j_{sc}}{j_f}} \dots \dots \dots \text{ ثانية (٥-١٨)}$$

وتراوح قيمة θ_m في الآلات الكهربائية بين ثانية واحدة وعشر ثواني .

مثال محلول (١) :

a 3—phase synchronous generator is rated at 1235 KW, 0.89 p.f. lagging when it is connected to 50 c/s infinite bus bars. It is driven at a speed of 125 r.p.m., and the moment of inertia of the rotating masses on the rotor is $1.17 \times 10^4 \text{ Kg.m.sec}^2$. When the generator is delivering its full load there is an angle of lead 23 degrees electrical. Find The period of free oscillations at full load. Assume the ratio of exciting current at full load to that at short circuit with full load current circulating equal to 2.2.

يوجد بهذه المسألة معلومات كافية لحساب زمن الذبذبة الحرة τ_n بجميع الطرق التي سبق شرحها. نحسب أولاً ما نحتاج إلى استخدامه في المعادلات (١٠-٥)، (١٤-٥)، (١٨-٥) على الترتيب :

$$\begin{aligned} GD^2 &= 4 g M = 4 \times 9.81 \times 1.17 \times 10^4 \\ &= 45.8 \times 10^4 \text{ Kg. m}^2 \end{aligned}$$

$$1 - \tau_n = \frac{125}{241} \sqrt{\frac{0.89 \times 45.8 \times 10^4}{50 \times 1235 \times 2.2}} = 0.898 \text{ secs}$$

$$T_d = \frac{973 \times 1235}{125} = 9620 \text{ Kg m.},$$

$$p = \frac{3000}{125} = 24$$

$$\delta_m = \frac{23}{24} \times \frac{\pi}{180} = 0.01675 \text{ radians (mechanical)}$$

$$T_s = \frac{9620}{0.01675} = 5.74 \times 10^5 \text{ Kg.m./mech.rad}$$

$$2 - \tau_n = 2\pi \sqrt{\frac{1.17 \times 10^4}{5.72 \times 10^5}} = 0.897 \text{ secs}$$

$$\theta_m = \frac{45.8 \times 10^4}{375} \times \frac{125}{9620} = 15.86 \text{ secs}$$

$$3 - \tau_n \approx 2.5 \sqrt{\frac{15.86}{50 \times 2.2}} \approx 0.945$$

نشأت الزيادة في قيمة τ_n ، في الحالة الثالثة، للتقريب في قيمة θ_m ، حيث استخدمنا $P_a \cos \phi$ بدلا من P_i في المعادلة (١٦ - ٥) . فاذا اعتبرنا أن $\eta \approx 0.9$ ، نجد أن :

$$\theta_m = \frac{45.8 \times 10^4}{375} \times \frac{125 \times 0.9}{9620} = 14.26 \text{ secs.}$$

$$\tau_n = 2.5 \sqrt{\frac{14.26}{50 \times 2.2}} = 0.9 \text{ secs.}$$

الذبذبات المفروضة (او القسرية) : (Enforced oscillations)

لا يكون عزم الدوران ثابتا في آلات الاحتراق الداخلي (عندما تدير لاحداها المولد) ، وكذلك في آلات الكبس (compressors) (عندما يدير لاحداها المحرك) وسوف نعتبر أن منحنى عزم الدوران يتكون في هذه الحالة من مركبة ثابتة T_d (في حالة المولد) ، ومركبة متغيرة على منحنى جيبي ، بسرعة زاوية $\omega_i (= 2\pi f_i)$ ، ذات اتساع T_i . هذا وعند وجود توافقيات عالية في منحنى عزم الدوران بخلاف التوافقية الاساسية T_i فانها تعطي تأثيرا يمكن حسابه بنفس الطريقة ، التي سوف نتبعها مع T_i . وتكون زاوية الحل ، التي تلذج بفعل مركبة عزم الدوران الثابتة T_d ، هي نفس الزاوية δ_0 ، كما سبق

في حالة الذبذبات الطبيعية ، مم يجمع على ذلك التغيرات الناشئة بفعل عزم الدوران المتردد T_i . وتكون المعادلة التفاضلية التي تعبر عن الحركة في هذه الحالة (مع إهمال فعل التخميد هنا أيضا) ، هي :

$$T_d = \frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \sin \delta_o + T_i \sin \omega_i t \dots\dots (٥-١٩)$$

سوف يتذبذب العضو الدائر حول وضع الاتزان الثابت ، الذي يتحدد بالزاوية δ_o ، بفعل عزم للدوران المتردد T_i بالتردد f_i ، ويقال إن الذبذبات مفروضة أو قسرية في هذه الحالة . فاذا اعتبرنا أنه عند اللحظة t تكون الزاوية δ_o قد زادت إلى δ ، حيث $\delta = \delta_o + \beta$ ، يصبح عزم الدوران المضاد مناظراً للزاوية δ ، بينما تعطى المعادلة (٥-١٩) عزم الدوران المحرك عند هذه اللحظة . وبتطبيق المعادلة (٥-١) مرة أخرى ، نجد أن :

$$\begin{aligned} M \frac{d\omega_m}{dt} &= T_d - T_e = \left[\frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \cdot \sin \delta_o \right. \\ &\quad \left. + T_i \sin \omega_i t \right] - \frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \cdot \sin (\delta_o + \beta) \\ &= \frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} [\sin \delta_o - \sin (\delta_o + \beta)] \\ &\quad + T_i \sin \omega_i t \dots\dots\dots (٥-٢٠) \end{aligned}$$

بنفس الطريقة التي اتبعناها في حالة الذبذبات الطبيعية ، ومع فرض أن β زاوية صغيرة أيضا ، نحصل على المعادلة التفاضلية للذبذبات القسرية كما يأتي :

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} + \frac{T_a p}{M} \cdot \frac{i_f}{i_c} \cdot \cos \delta_o \cdot \beta = \frac{p}{M} T_i \sin \omega_i t \dots (٥-٢١)$$

باستخدام ω_n بقيمتها السابقة تصبح المعادلة :

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} + \omega_n^2 \beta = \frac{p T_i}{M} \sin \omega_i t \dots \dots (٥-٢٢)$$

ويكون حل حالة الدوام (steady state solution) لهذه المعادلة :

$$\beta = \beta_m \sin \omega_i t , \quad \beta_m = \frac{p T_i}{M \omega_n^2} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2} (٥-٢٣)$$

وينتج عن تغير الزاوية δ تغير في القدرة ، كما سبق شرحه في حالة الذبذبات الطبيعية ، وتكون النهاية العظمى لتغير القدرة عندما تصبح $\beta = \beta_m$. لذلك يتعين علينا الآن أن نحدد مدى التغير في قيمة القدرة ΔP_e عندما تتغير β بين $-\beta_m$ و $+\beta_m$ ، لنرى ما إذا كان يمكن السماح بحدوث هذا التغير أولا . باعتبار β_m صغيرة ، نجد أن :

$$\Delta P_e = P_a \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} [\sin (\delta_o + \beta_m) - \sin \delta_o]$$

$$= P_a \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \cos \delta_o \cdot \beta_m$$

$$= P_a \cdot \frac{i_f}{i} \cdot \cos \delta_o \cdot \frac{p T_i}{M \omega_n^2} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2}$$

$$= P_a \cdot \frac{T_i \eta}{T_a} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2} \dots \dots \dots (٥-٢٤)$$

إذا فرضنا أن :

$$T_{dn} = \frac{T_a}{\eta} \cos \phi , \quad \varepsilon = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\tau_n}{\tau_i}\right)^2}$$

$$\therefore \Delta P_e = P_a \cos \phi \cdot \frac{T_i}{T_{dn}} \cdot \varepsilon \dots \dots \dots (٥-٢٤)$$

يطلق على ε اسم معامل التكبير (amplifying factor) ، وهو يتناسب تناسباً طردياً مع النسبة $\frac{\omega_i}{\omega_n}$ (أو $\frac{\tau_n}{\tau_i}$) ، بحيث تصبح قيمته مالا نهاية عندما تساوى هذه النسبة الواحد الصحيح ، أى عندما يساوى تردد الذبذبات القسرية f_i ، التى يسببها عزم الدوران المتردد T_i ، التردد الطبيعى للمجموعة f_n . وهذه هى حالة الرنين (resonance) ، حيث نحصل على أكبر قيمة ممكنة لـ β_m ، وبالتالي ΔP_e . لذلك يجب أن نتفادى حدوث هذا الرنين فى الحياة العملية على قدر الامكان . يبين شكل (١ - ٥ ب) منحنى المعامل ε كدالة للنسبة $\left(\frac{\tau_n}{\tau_i}\right)$ ويجب عدم نسيان أننا أهملنا كل تأثير للتخميد فى التحليلات السابقة .

مثال محلول (٢) :

a synchronous motor, having a rated output of 450 Kw and an efficiency of 0.95, runs at 136 r.p.m. when connected to a 50 c/s supply. The power factor is 0.9, GD² of the motor 50 tm², and the ratio i_f to i_{sc} is 2. The motor drives a one cylinder, double acting compressor, which requires a power of 400 KW. The torque-time-curve of the compressor contains a first harmonic of $\pm 10\%$, and a second harmonic of

$\pm 30\%$. Find the first and second harmonics of the pulsating power input of the motor.

$$P_a = \frac{450}{0.9 \times 0.95} = 527 \text{ KVA}$$

$$\tau_a = \frac{136}{241} \sqrt{\frac{70000}{50 \times 527 \times 2}} = 0.65 \text{ sec}$$

$$1 - \text{first harmonic} : \tau_{i1} = \frac{60}{136} = 0.44 \text{ sec}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{1 - \left(\frac{0.65}{0.44}\right)^2} = -0.85$$

$$\frac{T_{i1}}{T_{dn}} = \frac{0.1 \times 400}{450} = 0.09$$

$$\Delta P_{e1} = \pm 527 \times 0.9 \times 0.09 \times -0.85 = \mp 36.2 \text{ KW}$$

$$2 - \text{second harmonic} : \tau_{i2} = \frac{60}{2 \times 136} = 0.22 \text{ sec}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{1 - \left(\frac{0.65}{0.22}\right)^2} = -0.128$$

$$\frac{T_{i2}}{T_{dn}} = \frac{0.3 \times 400}{450} = 0.267$$

$$\Delta P_{e2} = \pm 527 \times 0.9 \times 0.267 \times -0.128 = \mp 16.2 \text{ KW}$$

$$\Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} = \mp 36.2 \mp 16.2 = \mp 52.4 = \mp 11.65\%$$

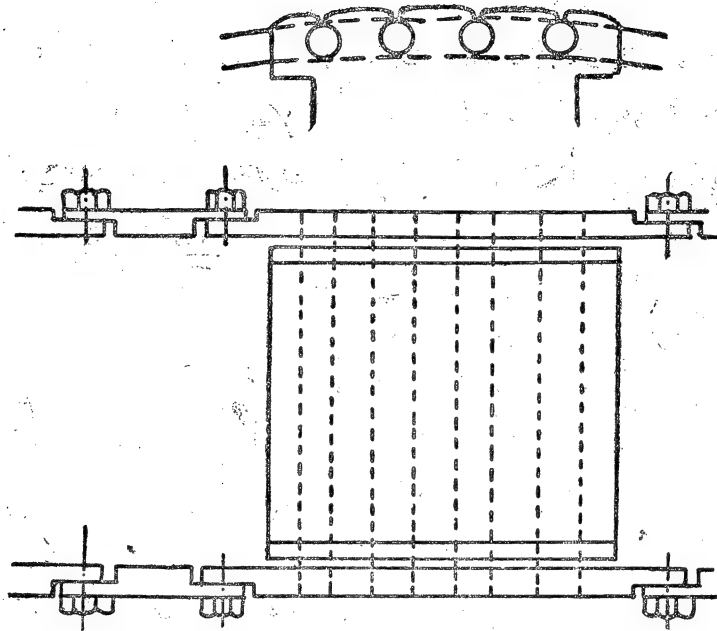
تخميد الاهتزازات واستخدام الخدافة :

(Damping of the oscillations and application of a fly-wheel)

ملفات التخميد (Damper windings) :

ينشأ عن الاهتزازات السابق دراستها حركة ترددية، زائدة (superimposed) على سرعة التزامن الثابتة لأقطاب العضو الدائر ، ذات تردد منخفض ، مما يؤدي إلى وجود حركة نسبية زائدة ، بنفس التردد ، بين وجوه الأقطاب ، وحديد المنتج ، والموصلات في المجارى ، والمجال المغناطيسى في الثغرة الهوائية ، فتتولد فيها جميعاً تيارات اعصارية (هندسة الآلات الكهربائية ٩٣) . هذه التيارات تعمل على تبديد الجزء من طاقة الحركة الكامنة في الكتلة الدائرية ، الناشئة عن تغير سرعتها بسبب الاهتزازات ، على شكل مفقودات حرارية I^2R . وهذا يؤدي إلى تخميد هذه الاهتزازات ، وعودة الأمور إلى نصابها الصحيح ، بعد تصحيح مقدار طاقة الحركة الكامنة في الكتلة الدائرية ، إذا كانت الاهتزازات طبيعية ، أو الحسد من شدة هذه الاهتزازات ، وتقليل مدى التأرجح في القدرة ، إذا كانت الاهتزازات قسرية . وقد أمكن جعل عملية التخميد أكثر فاعلية باستخدام ملفات التخميد (Damper windings) ، وهى عبارة عن قضبان عارية من النحاس ، مدفونة في مجارى بطول الأقطاب ، في أحذية هذه الأقطاب ، وموصلة معاً في كل ناحية ، من الناحيتين الأمامية والخلفية للآلة ، بحلقة من النحاس تلحم فيها جميعاً ، كما هو مبين في شكل (٢-٥) . وتتوقف فاعلية ملفات التخميد على مقاومة الحلقات الجانبية ، التى يجب أن تكون صغيرة إلى حد معين ، حتى تبسدد أكبر كمية من طاقة الحركة غير المرغوب فيها .

ومما كانت فاعلية التخميد ، فانه قد لا يكفي عند وجود اهتزازات قسرية ،

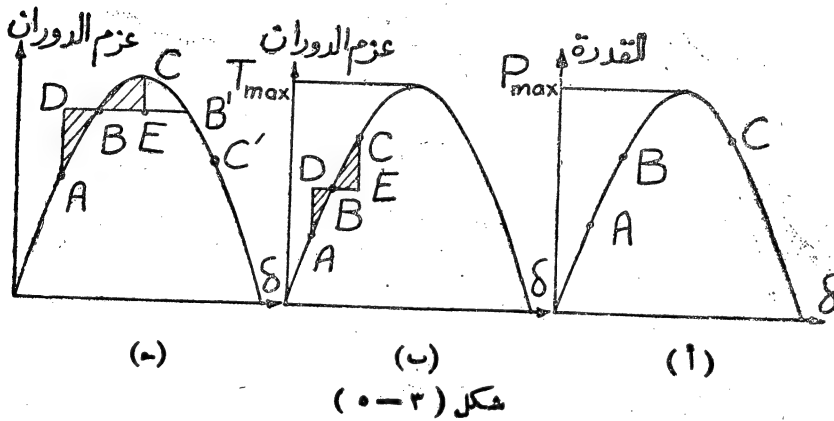


شكل (٢-٥)

وبخاصة عندما تكون f_1 قريبة من f_n ، حيث تزيد ΔP زيادة كبيرة . فإذا كانت f_1 أصغر قليلا من f_n ، يكون الحل بتكبير f_n ، لكي تباعد كثيرا عن f_1 بما فيه الكفاية ، وهذا لا يتأتى إلا بتصغير قيمة GD^2 ، وهي حالات نادرة . أما إذا كانت f_1 أكبر قليلا من f_n ، فإن الحل الداعي إلى تصغير f_n ، لكي تباعد كثيرا عن f_1 ، يكون بتكبير قيمة GD^2 . وهذا أسهل تنفيذا من الحالة السابقة ، وخصوصا بعد إتمام تصنيع الآلة ، وذلك بإضافة كتل على العضو الدائر ، تمثل في حدة ، يتوقف وزنها على مدى التصغير المطلوب في f_n (التي تناسب مع $\frac{1}{\tau_n}$)

اتزان الآلات المتزامنة : (stability of synchronous machines)

تبين المعادلة التقريبية للقوة (١١-٤) أن القدرة التي يأخذها المحرك من القضبان ، أو يعطيها المولد لهذه القضبان تتغير ، مع زاوية الحمل δ ، على منحنى جيبي ، وذلك باعتبار تنبيه ثابت للآلة . ونظراً لأن سرعة التزامن ثابتة ، فإنه يمكن رسم منحنى جيبي لعزم دوران الآلة ، على نفس النقط ، مع زاوية الحمل δ ، كما هو مبين في شكل (٣-٥) .



لكي ندرس موضوع اتزان الآلة المتزامنة نعتبر أولاً حالة محرك متزامن موصل إلى قضبان لانتهائية ، ونفترض أن التغير في القدرة وعزم الدوران يقع المنحنيين المعطيين في شكل (٣-٥) ، تبعاً لتغير زاوية الحمل δ . إذا أهملنا المفقودات ، فإنه بعد إجراء عملية التزامن ، وتوصيل المحرك إلى القضبان يصبح دائماً عليها بحيث تكون $V = E$ والتيار يساوى صفراً ، كما سبق شرحه . وتكون نقطة الأصل ٥ هي نقطة التشغيل على كل من منحنى القدرة وعزم الدوران في شكل (٣-٥) . إذا أخذنا في تحميل المحرك بمنتهى البطء ، بحيث يمكن للاجهزة المختلفة أن تقوم بمهامها في الأمانة المحددة لها ، وتتمكن المولدات التي تغذي

القضبان من اعطاء أجزاء الحمل المطلوبة بدون تأخير ، فإن سرعة المحرك تنخفض انخفاضا وقتيا ، حتى تصل قيمة الزاوية δ إلى تلك التي تناظر عزم الدوران المطلوب من المحرك ، كما يعطيه منحني عزم الدوران مع δ . بذلك تصبح نقطة التشغيل الجديدة هي A ، كما هو مبين في شكل (٣-٥ أ) ، ويعود المحرك إلى الدوران بسرعة التزامن . ويمكن زيادة الحمل على المحرك بعد ذلك ، على نفس الوتيرة ، حتى نصل إلى نقطة تشغيل جديدة مثل B . فإذا تجاوزنا في تحميل المحرك قيمة النهاية العظمى للقدرة P_{max} (ولعزم الدوران T_{max}) ، بحيث تناظر الزاوية δ نقطة التشغيل الجديدة C ، يصبح عزم الدوران المطلوب بذله من المحرك أكبر مما يعطيه المحرك عند نقطة C ، فيؤدي عزم دوران التخصير الناشئ في هذه الحالة إلى وقوف المحرك عن الدوران في نهاية الأمر ، وحدث دائرة قصر . فتقوم قواطع الدائرة الآلية (automatic circuit - breakers) بفصل المحرك عن القضبان . وبذلك نجد أن P_{max} هي قيمة النهاية العظمى للقدرة التي يمكن للمحرك أن يعطيها عند تحميله على درجات ، وبمتمهي البطء . ويطلق على P_{max} اسم حد القدرة للاتزان الاستاتيكي (limit of static stability) ، وهي نفس القدرة التي كنا نحصل عليها من مخطط الحمل الكهربائي ، عند نهاية الاتزان ، في الباب السابق .

لا يمكن الدورات في الحياة العملية أن تعطي الحمل المطلوب منها ، في نفس اللحظة مباشرة ، كما لا يمكن أيضا إجراء عملية التحميل بالتدريج وبدرجة البطء المقصودين فيما سبق . وفي هذه الحالة تكون قيمة النهاية العظمى للحمل ، التي لا يجب أن نتعداها ، عند إلقاء حمل مفاجئ على المحرك ، أقل بكثير من القيمة السابقة ، ويطلق عليها اسم حد الاتزان الديناميكي (limit of dynamic stability) .

وهذه القدرة تتحدد بعزم القصور الذاتي للكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك، وبقدرة المنظم على التجاوب مع متطلبات الحمل على المولد، وسرعة منظمات الضغط في تصحيح الضغط، وبالتالي على كل ما يمت بصلة إلى المؤثرات التي تتعدد خواص تشغيل المجموعة بأكملها في فترة التلاشي. وسوف نفترض في التحليل الآتي، من باب التبسيط، أن المجموعة كلها مثالية، بالنسبة للتجاوب اللحظي المباشر مع متطلبات الحمل على المحرك، وأن المؤثر الوحيد، الذي يسبب الفرق بين حدى الاتزان الاستاتيكي والديناميكي، هو عزم القصور الذاتي للكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك.

نفرض أن المحرك يدور بالحمل الذي يجعل نقطة التشغيل على منحنى عزم الدوران هي A في شكل (٣-٥ ب)، ثم ألقى حمل مفاجيء على المحرك، يتطلب التشغيل عند B. يكون التجاوب الطبيعي للمحرك، عند إلقاء الحمل المفاجيء عليه إنخفاض في سرعته (بسبب زيادة عزم الدوران المضاد على عزم الدوران المحرك)، لكن تصل الزاوية δ إلى قيمتها المناظرة لعزم الدوران عند B، وتنخفض سرعة المحرك في هذه الأثناء بمعدل ثابت، فتزداد الزاوية δ بمعدل ثابت أيضا، مما يؤدي إلى زيادة عزم الدوران المحرك تدريجيا على المنحنى من A إلى B. ويكون المحرك، في الفترة التي تمر بين تركه لنقطة التشغيل A، ووصوله إلى نقطة التشغيل B، دائراً بسرعة أقل من سرعة التزامن. فإذا أهملنا تأثيرات الاحتكاك والمفقودات على عزم الدوران، نستطيع أن نعتبر أن الهبوط في السرعة الزاوية من ω_0 إلى ω ، الذي يكون عبارة عن $\int_{\omega_0}^{\omega} d\omega$ ، يساوي

$$\left(\frac{d\delta}{dt} = \text{constant} \right) ABD \text{ المساحة مع تناسب مع } T_A \int_{T_A}^{T_B} \frac{T}{M} dt$$

وبالتالى فان طاقة الحركة المفقودة من الكتلة الدائرية ، فى هذه الأثناء ، يتناسب مع نفس المساحة .

عندما تصبح الزاوية δ مناظرة لعزم الدوران عند B ، ويكون المحرك دائراً بسرعة أقل من سرعة التزامن ، تظل سرعة المحرك آخذة فى الانخفاض ، والزاوية δ فى الازدياد ، وعزم الدوران المحرك أيضا فى الازدياد ، فيما وراء النقطة B ، وذلك بسبب عزم القصور الذاتى للكتلة الدائرية على عمود الادارة . حتى نصل إلى نقطة تشغيل معينة C . وفى خلال الفترة من B إلى C يكون عزم الدوران المحرك أكبر من عزم الدوران المضاد (عزم الدوران المضاد للحمل يساوى T_B) ، فيبدأ عزم دوران معجل ، يعمل على وقف التناقص فى سرعة المحرك ، وزيادتها مرة أخرى . ومن ثم يبدأ ، منذ الوصول إلى نقطة التشغيل C ، توقف معدل التزايد فى الزاوية δ ، والزيادة المناظرة فى عزم الدوران المحرك ، لكي يعمل عمله بمعدل تناقص فى هذه الزاوية ، وانخفاض مناظر فى عزم الدوران ، تمهيداً للعودة بنقطة التشغيل إلى B ، ثم بسبب عزم القصور الذاتى للكتلة الدائرية إلى A مرة أخرى . عند C يكون المحرك قد وصل إلى سرعة التزامن ، وتكون طاقة الحركة ، التى أضيفت إلى الكتلة الدائرية من B إلى C ، تساوى تلك التى فقدتها من A إلى B . وهذا شرط أساسى لكي يعود المحرك إلى الدوران بسرعة التزامن عند C ، ثم يتأرجح حول هذه السرعة ، حتى يتم تخميد الاهتزازات بوسائل التخميد المختلفة ، كما سبق شرحه عند الكلام عن الاهتزازات الطبيعية . ويتوفر هذا الشرط عندما تتساوى المساحتان ABD و BEC على منحنى عزم الدوران ، كما هو مبين فى شكل (٣ - هـ) ، عندما تقع النقطة C على الجزء الصاعد من المنحنى ، قبل الوصول إلى قمته . وفى هذه الحالة يكون تشغيل المحرك متزاناً (stable operation) ، تحت

تأثير التحميل المفاجيء من A إلى B .

أما إذا استدعى الأمر ، لكي يتم التساوى بين المساحتين المذكورتين ، أن تكون النقطة C واقعة على الجزء النازل من منحنى عزم الدوران بعد الوصول إلى قمته ، كما هو مبين في شكل (٣-٥) ، فإن هذا يعنى أنه في الفترة ، التي تمضي بين الوصول من القمة F إلى نقطة التشغيل C ، يأخذ عزم الدوران المحرك في التناقص ، مما يؤدي إلى وقف معدل الزيادة في السرعة ، قبل أن تصل إلى سرعة التزامن (عند C كما هو مفروض أصلاً) ، وذلك لإبتداء من المرور على النقطة F . وتبعاً لخواص منحنى التشغيل النازل للمحرك في هذه المنطقة ، فإن تناقص السرعة ، وزيادة الزاوية δ بالتالى ، يؤدي إلى تناقص عزم الدوران المحرك ، وزيادة عزم دوران التقصير ، الذي يساعد على خفض سرعة المحرك . فإذا جاءت النقطة C فوق النقطة B' التي تقع في مستوى النقطة B شكل (٣-٥ ب) ، فإن هذا يعنى أن عزم دوران المحرك لن يقل في هذه الفترة عن عزم دوران الحمل ، ويكون تشغيل المحرك متزاناً في هذه الحالة مثل الحالة السابقة . أما إذا جاءت النقطة C تحت النقطة B' ، فإن هذا يعنى أنه في خلال تحقيق شرط تساوى المساحتين ، لكي تكتسب الكتلة الدائرة ما فقدته من طاقة الحركة في خلال فترة التقصير ، سوف يهبط مستوى عزم الدوران المحرك عن مستوى عزم دوران الحمل مرة أخرى ، وذلك قبل أن يعود المحرك إلى سرعة التزامن . ونظراً لوجود المحرك في منطقة المنحنى النازل ، في هذه الأثناء ، فسوف يتوالى النقص في عزم دوران المحرك ، بناء على نقص السرعة ، ويزداد عزم دوران التقصير ، بناء على نقص عزم الدوران المحرك ، مما يزيد في نقص السرعة ، حتى يتوقف المحرك عن الدوران تماماً ، وتحدث دائرة القصر .

يتضح مما سبق أننا إذا أردنا معرفة مدى نصيب تشغيل المحرك من الاتزان، عندما يراد انتقال نقطة التشغيل من A إلى B، نتيجة لإزدياد عزم دوران الحمل المضاد فجأة من T_A إلى T_B ، نرسم الخط الأفقي DBB' ، كما هو مبين في شكل (٣) (٥)، فإذا كانت المساحة ABD أقل من المساحة التي يحصرها جزء المنحنى فوق BB' ، فإن هذا يعني أن C سوف تقع فوق B' ، ويكون التشغيل متزنا. أما إذا كانت المساحة ABD أكبر من المساحة التي يحصرها جزء المنحنى فوق BB' ، فإن هذا يعني أن C سوف تقع تحت B' ، ويكون التشغيل غير متزن.

أما بالنسبة للبولد المتزامن، ومدى تجاوبه مع الاحمال المفاجئة، المطلوب منه تزويد القضبان اللانهاية بها، مع غيره من المولدات، فإن مشاكل اتزانه ترتبط ارتباطا وثيقا بمدى قدرة المنظم في الآلة المحركة، سواء كانت حرارية أو هيدروليكية، على التجاوب المطلوب، بضبط مقدار الوقود أو سريان الماء، بالسرعة المناسبة. كما ترتبط أيضا بقدرة منظمات الضغط والتغذية، التي تعمل آليا بما يساعد على حفظ الاتزان، على أداء مهمتها بالسرعة والدقة المطلوبتين في مثل هذه الأحوال. وإذا بحثنا الأمر من نواحيه المختلفة، نجد أن سرعة تجاوب المولد مع تغيير مفاجيء في الحمل، تتوقف على سلسلة من العمليات، التي تخضع كل منها لعوامل التأخير، الناشئة عن فعل للقصور الذاتي، بالنسبة للحركة الميكانيكية للأجزاء الدائرة، وعن تأثير ثابت الزمن، بالنسبة للدوائر الكهربائية والمغناطيسية في الآلة. فإذا أخذنا في حسابنا أيضا تأثيرات دوائر الحمل، وخطوط النقل الكهربائية، التي تغذيها القضبان بالحمل، أصبح الموضوع غاية في التعقيد. وهو يخرج في الواقع عن مجال الدراسة في هذا الكتاب، لأن دراسته تتعلق حينئذ بدراسة خطوط النقل الكهربائية، التي تؤثر ثوابتها، والاحمال التي تنقلها،

تأثيراً مباشراً على اتزان الشبكة الكهربائية، كوحدة، بما في ذلك الآلة المتزامنة، ومتطلبات اتزانها. ولكننا قبل أن نترك هذا الموضوع نشير إلى أمرين هاميين، بالنسبة لإتزان المولد المتزامن، في هذا المجال:

١ — يجب أن نلاحظ أن تغيير تيار الحمل ينعكس تأثيره على تيار التنبيه، من ناحية أن هذا التغيير يشتمل على تغيير في مركبة التيار، التي تعطى التأثير المغناطيسي المضاد أو المباشر في رد فعل المنتج. فإذا رفع حمل ذو معامل قدرة منخفض متأخر، فإن قيمة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية تميل نحو الزيادة ويتأخر ظهور هذه الزيادة بفعل التيارات الاعصارية، التي تظهر نتيجة لهذا التغيير في قيمة الفيض، في الأجزاء الحديدية الصماء (solid iron parts) الآلة، وفي ملفات المجال. كما يتأخر ظهور الزيادة في الفيض المغناطيسي أيضاً بسبب معامل الحث الذاتي للملفات المجال، وتعمل هذه الزيادة البطيئة على توليد قوة دافعة كهربية مضادة بالتأثير في ملفات المجال، مما يؤدي إلى خفض قيمة تيار التنبيه، في هذه الأثناء، حتى ولو ظل ضغط التنبيه ثابتاً. وهذا يعني أن التأثير الناجم عن التأخير في تجاوب دائرة التنبيه (نتيجة لثابت الزمن في هذه الدائرة، وثابت الزمن في الدائرة المغناطيسية) بتقليل تيار التنبيه، لمواجهة انخفاض تأثير رد فعل المنتج المضاد، سوف يعوض، إلى حد ما، بما يجرى من ردود الفعل السابق شرحها. وتبلغ قيمة ثابت الزمن للدولد التوربينى، في مثل هذه الأحوال حوالي 5 أو 6 ثواني، وهي تختلف باختلاف مقدار الحمل.

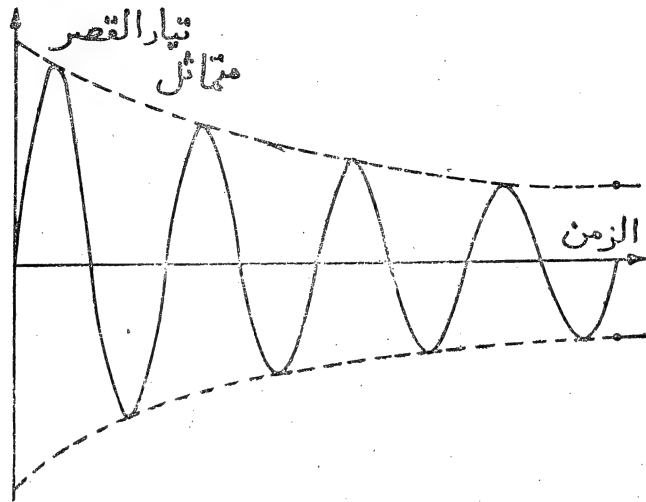
٢ — يكون الموضوع أكثر تعقيداً مع مجموعات التوربينات المائية، نظراً لانخفاض قيمة GD^2 للدولد، في هذه الحالة، كثيراً عن قيمها للأجزاء الباقية في المجموعة، مما يجعل السرعة عرضة لتغيرات سريعة، عندما يحدث تغيير كبير في

الحمل . وإلى جانب ذلك فإن عامل القصور الذاتي بالنسبة للماء يكون أكثر تأميراً منه في حالة البخار ، بحيث يحتاج الأمر إلى وقت أطول كثيراً ، في حالة الماء ، لضبط المنظم على الوضع الذي يتلائم مع الحمل الجديد . لذلك نتوقع ، عند رفع الحمل عن المولدات التي تديرها التوربينات المائية ، أن تزداد السرعة إلى حوالي 200% من سرعة التزامن ، قبل أن يتمكن المنظم من ضبط سريران الماء في التوربينات بما يناظر الوضع الجديد . لذلك نحتاج في هذه الحالة إلى تحاسوب سريع ، من دائرة تيار التنبيه ، لخفض الضغط ، حتى لا يصل إلى قيمة تصبح خطيرة بالنسبة للواد العازلة على الموصلات .

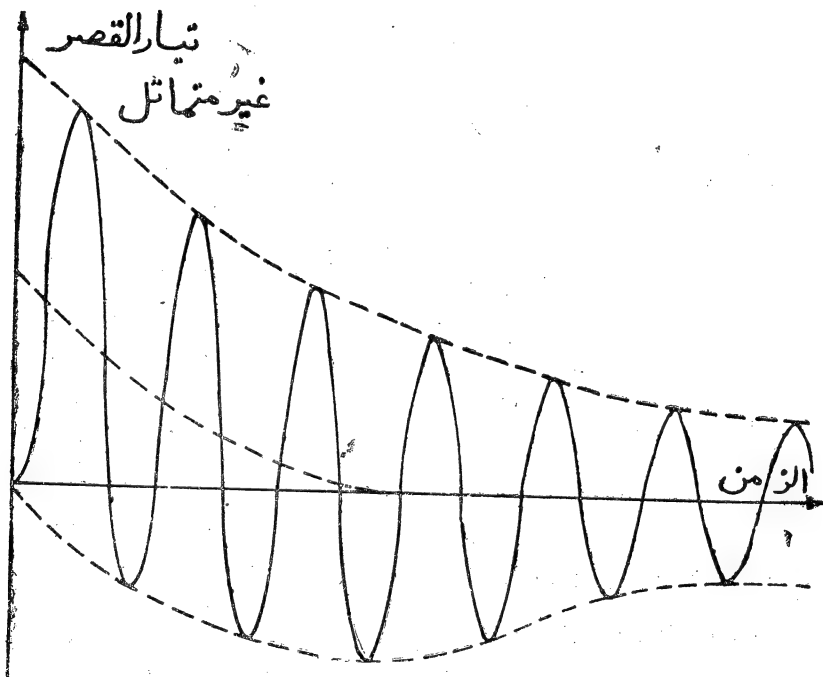
٣ — تتوقف قيمة القدرة وعزم الدوران ، عند أية لحظة أثناء التشغيل ، على قيم V, E_0, δ, X_s . وقد رأينا أن E_0 و δ (ويمكن V في بعض الحالات) تحتاج إلى فترة معينة حتى تستقر على القيم الجديدة ، إذا ما حدث أى تغيير مفاجئ . في الحمل ، وأن الآلة عرضة لأن تخرج عن حد الاتزان في هذه الفترة ، حتى لو لم تخرج قيمة الحمل المطلوب عن حد الاتزان الإسمائى . وتكون هذه الفترة في الواقع عبارة عن فترة ثلاثى (Transient period) ، تنتقل الآلة في أثناءها من حالة دوام (steady state) إلى حالة دوام أخرى مناظرة للحمل الجديد . ويجب أن نراعى أن X_s تتعرض هي الأخرى إلى تغييرات جوهرية في أثناء فترة الثلاثى هذه ، كما أن قيمتها قد تختلف كثيراً في حالتى الدوام ، بسبب اختلاف درجة التشبع في الحالتين . هذا ويكون الاختلاف في X_s واضحاً ومحدداً في حالة دائرة القصر على الآلة ، حيث تشدرج بين ثلاث قيم متعارف عليها على النحو التالى . في البداية ، وقبل أن يظهر تأثير رد فعل المنتج ، بسبب ثابت الزمن اكل من الدائرة الكهربائية والدائرة المغناطيسية ، تكون عازلة الثلاثى (transient)

(reactance) هي الفعالة ، وهي أقل من ممانعة التزامن العادية كثيراً ، وتساوى في قيمتها ممانعة التسرب في العضو الثابت والعضو الدائر . ونظراً لأن ملفات التخميد تكون أقرب إلى العضو الثابت من العضو الدائر ، عند وجود هذه الملفات ، وبفعل الأجزاء الحديدية الصماء للقريبة من العضو الثابت ، في الآلات التي لا تحتوي على هذا النوع من الملفات ، يظهر أولاً فعل ممانعة تحت التلاشي (subtransient reactance) ، التي تساوى في قيمتها ممانعة التسرب في العضو الثابت ، وحول ملفات التخميد أو الأجزاء الحديدية الصماء ، ولكن ترتفع قيمتها بسرعة إلى ممانعة التلاشي ، حين يجد الفيض المغناطيسي طريقه إلى مسالك التسرب في العضو الدائر . لذلك فإن تيار القصر يبدأ بقيمة عالية جداً ، تكون محددة بممانعة تحت التلاشي ، ولكنه لا يستمر أكثر من دورة أو دورتين بهذه القيمة ، حتى يصبح عدداً بممانعة التلاشي ، التي تزداد قيمتها تدريجياً ، مع تدرج ظهور رد فعل المنتج ، حتى تستقر في النهاية على قيمة ممانعة التزامن ، الملاحظة لتيار القصر الدائم ، الذي رمزنا إليه بالرمز I_{sc} .

فاذا رمزنا لممانعة تحت التلاشي بالرمز X' ، ورمزنا لممانعة التلاشي بالرمز X'' ، فإن اتساع تيار القصر يتدرج في القيمة من $\frac{V}{X''}$ إلى $\frac{V}{X'}$ ، حتى يستقر في النهاية على القيمة $\frac{V}{X_s}$ (مع إهمال تأثير مقاومة ملفات المنتج) ، كما هو مبين في شكل (٤ - هـ ، أ ، ب) . شكل أ للحالة التي تحدث فيها دائرة القصر عندما يكون الضغط ماراً بقيمة للصفر (أسوأ الأحوال) ، وشكل ب للحالة التي تحدث فيها دائرة القصر عندما يكون الضغط ماراً بقيمة النهاية العظمى له . ففي الحالة الأولى نحصل على تيار قصر غير متماثل (asymmetrical short circuit current) .



شكل (٤ - أ)



شكل (٤ - ب)

وفي الحالة الثانية نحصل على تيار قصر متماثل (symmetrical short circuit current). هذا ويعتبرنا تبلغ قيمة تيار القصر المتماثل حوالى عشرة أمثال تيار القصر العادى فى مرحلة تحت التلاشى ، فان هذه القيمة قد ترتفع إلى حوالى عشرين مثل فى حالة تيار القصر غير المتماثل ، وذلك بسبب احتوائه على مركبة تلاشى تعرف باسم مركبة التيار المستمر (direct current component) . وفى حالة المولدات التوربينية نجد أنه عندما تكون X_s حوالى 175% ، فان X' تبلغ حوالى 20% إلى 30% ، وتبلغ X'' حوالى 12% إلى 20% . وكما أنه يمكن تقسيم X_s إلى $X_{sd}^{(1)}$ ، مانعة التزامن فى المحور المباشر للآلة (Direct axis synchronous reactance) ، X_{sc} ، مانعة التزامن فى المحور المتعامد للآلة (quadrature axis synchronous reactance) ، فانه يمكن تقسيم X' إلى X_d' ، X_c' و X'' إلى X_c'' ، X_d'' .

مسائل على الباب الخامس

- 1 — Calculate the natural period of oscillation of a 2000 KVA, 3-phase alternator having a short circuit reactance of 30%, running at 750 r.p.m. on 2000 V, 25 c/s bus-bars. The moment of inertia of the complete rotating system is 200000 lb.-ft².
- 2 — A 6000 KVA, 5000 V, 50 c/s, 3-phase alternator with 4 poles and a short circuit reactance of 25%.

(١) X_{sd} هى الممانعة المكافئة ، التى تأخذ فى الحسب تأثير رد فعل المنتج المباشر ، و X_{sc} هى الممانعة المكافئة ، التى تأخذ فى الحسب تأثير رد فعل المنتج المتعامد . ونظرا لأن المعاوقة المغناطيسية لمسار خطوط القوى فى المحور المتعامد تكون أكبر كثيرا منها فى المحور المباشر فان قيمة X_{sd} تكون أكبر من قيمة X_{sc} .

operates on constant voltage and constant frequency bus-bars. The moment of inertia of the whole rotating system is 400000 lb.-ft². Calculate the time of one complete oscillation.

- 3 — Calculate the natural period of oscillation of a 50 c/s, 10000 KVA, 6600 V, alternator driven at 1500 r.p.m. and connected to infinite bus-bars. The steady short circuit current is five times the normal full load value, and the moment of inertia of the rotating mass is 400000 lb.-ft².
- 4 — An alternator driven by a slow-speed prime mover having a cyclic irregularity of frequency of 1.66 per sec, is working in parallel with other machines. The natural period of oscillation of the alternator on infinite bus-bars is 1 sec. Calculate the ratio by which the amplitude of oscillation is increased by the synchronising effects of parallel running.

الباب السادس

تصميم الآلات المتزامنة

Design of synchronous Machines

الأبعاد الرئيسية أو الموجهة :

(Main or leading dimensions)

يرتبط البعدان الرئيسيان أو الموجهان للآلة D و l_i ، بكل من الحمل النوعي الكهربائي AC والحمل النوعي المغناطيسي B_a ، بعلاقة شديدة بتلك التي حصلنا عليها في حالة التيار المستمر (١) (هندسة الآلات الكهربائية صفحة ٥٤٠ ، المعادلة ٢ - ١٢) . فإذا كانت KVA_i هي مقنن قدرة المنتج بالكيلوفولت أمبير ، نجد أن :

$$KVA_i = 3EI \times 10^{-3} = 3 \times 4.44 \phi \frac{pn_s}{60} T_{ph} k_{\omega} I \times 10^{-11}$$

$$= 3 \times 4.44 \times \frac{\pi D}{2p} l_i B_a \times \frac{pn_s}{60}$$

$$\times \frac{\pi DAC}{6I} k_{\omega} I \times 10^{-11}$$

$$= 0.183 B_a A C \times 10^{-11} \times k_{\omega} D^2 l_i = C_o D^2 l_i n_s (٦-١)$$

$$C_o = 0.183 B_a A C \times 10^{-11} \times k_{\omega}$$

(١) سرف نغتمد كثيراً عل منهاج التصميم لآلات التيار المستمر ، لذلك يستحسن

مراجعة الباب الثاني عشي من هندسة الآلات الكهربائية قبل دراسة هذا الباب .

C_0 هو ثابت المخرج للآلة ، و D قطر المنتج و l_1 طوله المثالي بالسنتيمترات . ويمكن إعادة نفس الكلام ، الذي رددناه في حالة آلات التيار المستمر ، عن مدى تأثير D ، l_1 بكل من B ، AC الملائمة للحالات المختلفة ، فيمكن الاعتماد في ذلك على ما يأتي : تكون كثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية للآلة أقل قليلا من نظيرتها في آلات التيار المستمر ؛ لكي نحصل على كثافة خطوط في السنة أقل أيضا من تلك التي نحصل عليها في آلات التيار المستمر ، حتى لا تزداد المفقودات الحديدية في الآسنان ، لأن التردد هنا ثابت عند أعلى قيمة يمكن السماح بها في آلات التيار المستمر ، وهي 50 ذبذبة في الثانية . وتتراوح قيمة كثافة الخطوط B_a ، التي يمكن استخدامها في الآلات المتزامنة ، بين 5000 خط/سم² في الآلات ذات الخطوة القطبية القصيرة ، والتي يكون عدد الأقطاب فيها حوالي أربعة ، وبين 7000 خط/سم² في الآلات ذات الخطوة القطبية الطويلة ، والتي يبلغ عدد الأقطاب فيها 16 أو أكثر . ويمكن التجاوز قليلا عن هذه الأرقام في حالات خاصة . أما بالنسبة لـ AC فإن قيمتها تتراوح بين 200 ، 500 على حسب قدرة الآلة وعدد أقطابها . وعلى العموم فإن إختيار القيم المناسبة لكل من B_a ، AC يتوقف أساسا على الخبرة المكتسبة من خلال صناعة الآلات الكهربائية في سنوات طويلة ، ويستحسن الاعتماد على الأرقام التي تسمح مصانع الآلات الكهربائية بفشرها في هذا المضمار .

نحتاج إلى تحديد النسبة $\lambda = \frac{l_1}{\tau_p}$ ، كما فعلنا في آلات التيار المستمر لفصل D عن l_1 في المعادلة (١-٦) ، ويكون ذلك على النحو الآتي :

$$l_1 = \lambda \tau_p = \lambda \frac{\pi D}{2p} \dots\dots\dots (٢-٦)$$

بالتعويض في المعادلة (١-٦) ينتج أن:

$$KVA = C_o \frac{\lambda \pi}{2p} D^3 n_s, \quad D = \sqrt[3]{\frac{2p}{\lambda \pi} \frac{KVA_i}{C_o n_s}} \dots (٦-٢)$$

وبالتعويض في (٦-٢) من (٦-٢) نحصل على قيمة λ_i . هذا ويمكن تحديد قيمة λ ، على أساس عدد الأقطاب، في الآلات المتزامنة ذات الأقطاب البارزة، من الجدول الآتي:

p	2	4	6	8	10	12	16	20	24	30
λ	0.75	1	1.25	1.45	1.6	1.75	2	2.25	2.45	2.75

أما بالنسبة للآلات التوربينية ($p = 1$) فتحدد قيمة λ ، على أساس قدرة الآلة N_p بالكيلووات، من الجدول الآتي:

N_s	2	4	6	8	12	16	24	32	$\times 10^3$	
λ	0.8	0.9	1.08	1.18	1.3	1.5	1.75	1.85		

هذا ويمكن عموماً استخدام العلاقة الآتية لتحديد قيمة λ :

$$\lambda = 0.5 \sqrt{p} \dots \dots \dots (٦-٤)$$

يمكن استخدام المعادلة التجريبية (empirical formula) الآتية للحصول

على قطر الآلة:

$$D = 12 + 1.3 \sqrt[3]{\frac{85 KVA \times 10^3 p}{n_s \lambda}} \dots (٦-٥)$$

هذا وتوجد معادلة أخرى تجريبية تعتمد في استنباطها على المعادلة (٥-٥)

(٦) ، وهي تعطى قيمة الخطوة القطبية τ_p للآلة مباشرة ، وتكون نتائجها أكثر دقة من المعادلة السابقة ، وهذه هي :

$$\tau_p = a + b \sqrt[3]{\frac{N_{si}}{f \lambda p}} \text{ cms} \dots\dots\dots (١٦-٥)$$

حيث a , b ثابتان يمكن تحديد كل منهما على أساس عدد أزواج الأقطاب في الآلة من الجدول الآتي :

الآلات ذات الأقطاب البارزة					الآلات التوربينية
p	2	3	4	≥ 10	1
a	11.2	7.48	5.6	3.75	35
b	2.025				1.65

$$N_{sN} = 3VI = KVA \times 10^3$$

$$N_{si} = 3EI = N_{sN} (1 + \varepsilon \sin \phi)$$

$$\varepsilon = \frac{IX_1}{V} \approx 0.05 \rightarrow 0.15 \dots (١٦-٥)$$

على أن تستخدم قيم λ المناسبة من الجداول المعطاة سابقا .

ويجب مراجعة قيمة السرعة المحيطية للآلة بعد تحديد قطرها D . ويلاحظ أنه باعتبار أن التردد f يساوى 50 ذبذبة في الثانية ، تصبح قيمة السرعة المحيطية بالمتر في الثانية مساوية عدديا لطول الخطوة القطبية τ_p بالسنتيمترات ، حيث :

$$v \text{ m/sec} = \frac{\pi D n_s}{6000} = \frac{\pi D n_s}{2 \times 3000} = \frac{\pi D}{2p} = \tau_p \text{ cms}$$

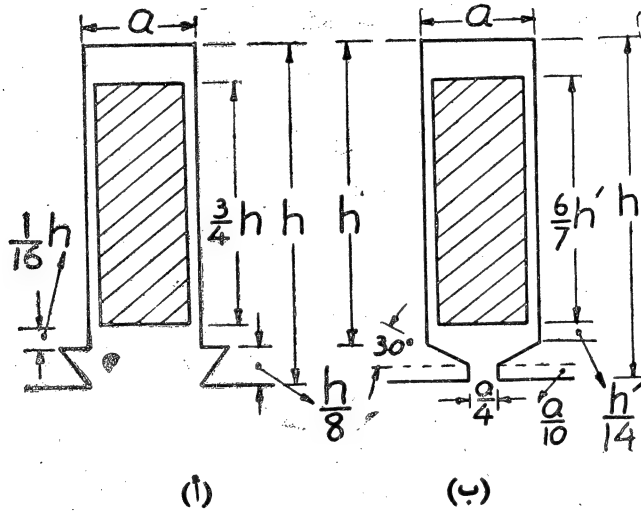
لذلك يراعى تحديد قيمة τ_p ، إذا أردنا تحديد السرعة المحيطية للآلة . وفي الآلات التوربينية التي تعمل في المحطات المائية ، وتديرها التوربينات المائية ، يؤدي رفع الحمل فجأة إلى زيادة في سرعة الآلة ، حتى تصل إلى 180% من n_p ، وذلك بسبب عزم القصور الذاتي الكبير للياه المتدفقة ، التي لا يستطيع المنظم حجزها ، إلا بعد وقت ملحوظ ، كما سبقت الإشارة إليه في الباب الرابع . لذلك تصمم مثل هذه الآلات على أساس احتمالها هذه السرعات العالية . فإذا اعتبرنا أن السرعة يجب ألا تتعدى 90 متراً في الثانية ، فمعنى هذا أن السرعة المحيطية للآلة ، المناظرة لـ سرعة التزامن n_p ، يجب ألا تتعدى الرقم $\frac{90}{1.8} = 50$ متراً في الثانية . وفي هذه الحالة لا يجب أن يتعدى طول الخطوة القطبية للآلة الرقم 50 سنتيمتراً . فإذا نتج عن زيادة الحمل ، الذي يتم تصميم الآلة على أساسه ، زيادة طول الخطوة القطبية عن هذا الرقم ، يجب تعديل التصميم على أساس أن الخطوة القطبية 50 سنتيمتراً فقط . وفي هذه الحالة سوف يزداد طول الآلة لمواجهة الزيادة المطلوبة في حجم حديد المنتج ، مما يؤدي إلى زيادة ملحوظة في قيمة λ عن تلك التي أعطيت في الجدول السابق . وعلى العكس من ذلك نجد أنه في حالة الآلات ، التي تستخدم معها حداقة ، نحتاج إلى جعل الخطوة القطبية أطول من المعتاد ، مما يؤدي إلى إعطاء λ قياً أقل من تلك التي جاءت في الجدول السابق .

بالنسبة للطول المثالي l_1 ، يجب أن نحدد على أساسه الأطوال l_2 ، l_p ، b وكذلك عرض فتحة التهوية b_p ، كما سبق أن فعلنا في حالة آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربائية صفحة ٢٢٧ وشكله ٤-٤) . وتكون حدودنا في هذه الحالة هي أن b تتراوح بين 8 ، 10 سنتيمترات ، عندما لا يزيد عدد فتحات التهوية عن اثنين ، هذا ويكون عرض فتحة التهوية في حدود سنتيمتر واحد .

اختيار عدد المجارى وتصميم ملفات المفتج :

يستخدم نوعان من المجارى فى الآلات المتزامنة ، المجارى المفتوحة

(open slots) ، والمجارى نصف المغلقة (semi-closed slots) ، شكل (١)

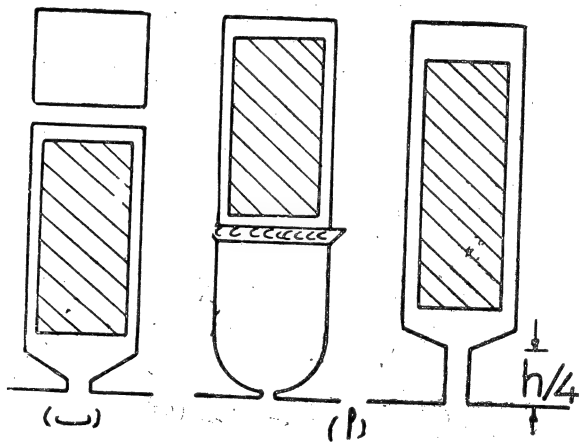


شكل (١-٦)

٦- أ، ب) على الترتيب . وتستخدم المجارى المفتوحة مع الآلات ذات الأقطاب البارزة غالبا ، وذلك حتى يمكن تجميع الملفات وعزلها ؛ ثم اسقاطها فى المجارى المفتوحة ، كما سبق الإشارة اليه فى الباب الاول . وهذا لا يمنع من استخدام المجارى نصف المغلقة مع هذا النوع من الآلات أيضا ، وذلك عندما تكون قدرتها صغيرة ، وعدد أقطابها منخفضا (أربعة أقطاب فى الغالب) . وعلى العكس من ذلك يكون الغالب استخدام المجارى نصف المغلقة فى حالة الآلات التوربينية ، وذلك لأن المجارى المفتوحة تتسبب فى زيادة مفقودات الحديد ، وارتفاع نسبة التوافقيات العالية فى منحنى الضغط . ولكن يمكن مع ذلك استخدام المجارى المفتوحة مع الآلات التوربينية ذات القدرات المنخفضة ، عند تصميمها على ضغوط

مرتفعة . هذا وتكون المجارى ذات جدران متوازية (parallel sided) في جميع الأحوال .

يختلف شكل المجرى ، في بعض الحالات الخاصة ، عما جاء في شكل (١-٦) .
ويبين شكل (٢-٦ أ) شكلين للمجرى ، عندما يراد زيادة التسرب في المجارى



شكل (٢-٦)

لتحديد قيمة تيار القصر المفاجئ . ، كما يمكن أن يتخذ المجرى الشكل المبين في شكل (٢-٦ ب) ، عندما يراد الوصول بفاعلية التهوية إلى قاع المجرى .

يتوقف اختيار عدد المجارى لكل مرحلة تحت كل قطب q غالباً على طول الخطوة القطبية ، وعلى الضغط . فكلما قل طول الخطوة القطبية ، وارتفعت قيمة الضغط ، كلما زاد الاتجاه نحو تقليل عدد المجارى في الآلة . وفيما يلي بعض الحدود التي يمكن أن تقع فيها قيمة q .

$$1.5 \leq q \leq 5$$

الآلات ذات الأقطاب البارزة

$$5 \leq q \leq 12$$

الآلات التوربينية

وتكون حدود خطوة المجرى بالسنتيمترات كما يلي :

$$2.5 \leq \tau_s \leq 6.5$$

الآلات ذات الأقطاب البارزة .

$$3 \leq \tau_s \leq 7$$

الآلات التوربينية :

تزود الآلات ذات الأقطاب البارزة في الغالب بملفات مزدوجة الطبقة . ويفضل ، لتحسين شكل موجة الضغط ، وتموجات الأسنان ، استخدام قيمة كسرية لـ q ، وقد سبق إيضاح هذا كله في البابين الأول والثاني . ونحتاج ، لتصميم ملفات المنتج ، على هدى ما جاء في هذين البابين ، إلى تحديد عدد الموصلات الكلية Z ، بعد تحديد قيمة q . ويكون ذلك إما عن طريق معادلة القوة الدافعة الكهربائية ، أو من قيمة AC ، كما سبق أن فعلنا مع آلات التيار المستمر .

تحديد أبعاد المجرى :

نبدأ أولاً بتحديد مساحة مقطع الموصل اللازم لحمل تيار الحمل الكامل I ، وذلك عن طريق فرض قيمة مناسبة لكثافة التيار δ_a في موصلات المنتج ، وهي تراوح بين 2,5 - 3,8 أمبير لكل مم² في الآلات ذات الأقطاب البارزة ، وبين 2 - 3 أمبير/مم² في الآلات التوربينية . هذا ويجب أن يتراوح حاصل الضرب $\delta_a AC$ بين الحدين 1000 - 1800 في نوعي الآلات . ويراعى ، عند تحديد مساحة الموصل وبعديه ، عمل حساب إستدارة الموصل عند الأركان ، كما سبق أن فعلنا في آلات التيار المستمر ، كما يراعى أن الموصل سوف يوضع في المجرى بحيث يكون عرضه في اتجاه عمق المجرى ، كما سبق شرحه في آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربائية صفحة ٥٥٦ ، شكل (١-١٢)) .

يمكن حساب عرض المجرى وعمقه ، بنفس الطريقة التى اتبعناها فى آلات التيار المستمر ، وذلك بترتيب الموصلات فى المجارى ، مع أخذ سمك العازل عليها ، وفى المجارى ، فى الحسبان (هندسة الآلات الكهربائية صفحة ٥٥٧ إلى صفحة ٥٦١) ، مع فارق وحيد ، وهو أن يكتفى ، عند حساب سمك العازل على الموصلات ، فى حالتنا هذه ، أن يضاف ملليمتر واحد إلى كل من طول وعرض الموصل .

هذا ويمكن إيجاد عرض السنة عند القمة b_t ، وعرض المجرى b_s ، أى عند سطح المنتج ، على أساس قيمة معينة للنهاية العظمى لكثافة الفيض فى الاسنان B_{tm} ، وذلك بالاستفادة من المعادلتين (١٧-٤) ، (٢٠-٤) فى كتاب هندسة الآلات الكهربائية ، على النحو التالى :

$$\phi_t = \frac{\phi_s}{\alpha \frac{2p}{\pi}} , \quad \phi_t = B_{mt} \times k_{ia} \times l \times b_t$$

حيث k_{ia} هو معامل حديد المنتج ، l هو مجموع أطوال قطاعات المنتج .

$$\phi = B_a \tau_p l_i = B_a \frac{\pi D}{2p} l_i$$

$$\therefore B_{tm} \times k_{ia} \times l \times b_t = \frac{B_a \frac{\pi D}{2p} l_i}{\alpha \frac{S}{2p}}$$

$$b_t = \frac{l_i}{l k_{ia}} \times \frac{B_a}{\alpha B_{tm}} \times \tau_s$$

$$b_s = \tau_s - b_t = \tau_s \left[1 - \frac{l_i B_a}{l k_{ia} \alpha B_{tm}} \right] \dots\dots (٦-٦)$$

يراجع عمق المجرى h ، والنسبة بين عمقه وعرضه a بعد ذلك على الحدود

الآتية :

الآلات ذات الأقطاب البارزة : $3 \leq h \leq 10 \text{ cms}$

الآلات التوربينية : $4.5 \leq h \leq 16 \text{ cms}$

تستخدم الأرقام العالية مع الآلات ذات القدرات الكبيرة ، وتقل قيمة h كلما انخفضت قيمة قدرة الآلة ، كما أن حدود هذه الأرقام تكون صحيحة عند عدم استخدام فتحات تهوية في المجرى ، على حسب ما هو مبين في شكل (٢-٦ ب) .

الآلات ذات الأقطاب البارزة : $3 \leq \frac{h}{a} \leq 4$

الآلات التوربينية : $4 \leq \frac{h}{a} \leq 7$

يجب بعد تحديد أبعاد المجرى المراجعة على كثافة الخطوط المغناطيسية عند أضيق مقطع للسنة ، أو عند المقطع الذى يبعد عنه بمقدار ثلث ارتفاع السنة ، بنفس الطريقة التى اتبعناها فى آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربائية من صفحة ٢٣٤ إلى صفحة ٢٤٤) ، مع ملاحظة أن أضيق مقاطع السنة فى الآلات المتزامنة يكون عند القمة ، نظراً لأن المنتج هو العضو الثابت فى هذه الحالة ، وملاحظة أن الفرق بين كثافة الخطوط الظاهرية وكثافتها الحقيقية قد لا يكون واضحاً ، عندما تقل الكثافة الظاهرية عن 18000 خط/سم^٢ . هذا ويجب أن تتراوح قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط عند القمة من 18500 خط/سم^٢ إلى 16000 خط/سم^٢ ، يقابلها عند المقطع الأوسط للسنة القيمتان 15500 خط/سم^٢ ، 13500 خط/سم^٢ .

تحديد هوق قلب المنتج تحت الاسنان :

يكون تحديد هوق قلب المنتج تحت الاسنان ، على أساس قيمة معينة لكثافة الخطوط المغناطيسية ، بنفس الطريقة التي اتبعناها في آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربائية صفحتي ٢٤٥ ، ٢٤٦) . هذا وتراوح كثافة الخطوط في هذه الحالة بين 10000 خط/سم² و 13000 خط/سم² في الآلات ذات الأقطاب البارزة ، وبين 10000 خط/سم² و 14000 خط/سم² في الآلات التوربينية .

طول الثغرة الهوائية :

يتم تحديد طول الثغرة الهوائية في الآلات المتزامنة ، في حالات كثيرة ، كما فعلنا في آلات التيار المستمر ، على أساس حد معين ، نسمح به ، بالنسبة لتحويل أو تشويه شكل منحنى المجال المغناطيسي للأقطاب الرئيسية (Distortion of field waveform) بفعل المجال المغناطيسي للمفاتيح (رد فعل المنتج) ، ويتوقف هذا التحويل ، الذي يسمح به ، علاوة على ذلك ، على شكل حذاء القطب ، وكذلك على القوة الدافعة المغناطيسية لكل من رد فعل المنتج ، والامبير لفات على الأقطاب الرئيسية . فإذا فرضنا أن النسبة بين قيم النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية عند الحمل الكامل ، وقيمها عند اللا حمل ، هي 1.5 ، وأن النسبة $\alpha = \left(\frac{b_c}{\tau_p} \right)$ تتراوح قيمتها بين الحدين من 0.55 إلى 0.7 ، نجد أن نسبة طول الثغرة الهوائية إلى الخطوة القطبية τ_p ، في الآلات ذات الأقطاب البارزة ، تقع هي الأخرى بين حدين مناظرين ، هما على الترتيب :

$$\frac{\delta_o}{\tau_p} = 0.55 \frac{AC}{B_a} \quad (\alpha = 0.55) ,$$

$$\frac{\delta_o}{\tau_p} = 0.64 \frac{AC}{B_a} \quad (\alpha = 0.7) \dots (٦-٧)$$

ويمكن عموما حساب قيمة تقريبية لكل قيم α هي :

$$\frac{\delta_0}{\tau_p} \approx 0.5 \frac{AC}{B_a} \dots\dots\dots (٨-١٦)$$

فاذا كان حذاء القطب مشكل بحيث يعطى شكلا جيوميا لمنحنى المجال بين
حدى القطب، يمكن أن نأخذ قيمة δ_0 من المعادلة الآتية :

$$\delta_0 \approx 0.3 \frac{AC}{B_a} \tau_p \dots\dots\dots (٨-١٦ ب)$$

وهذه هي قيمة δ_0 عند منتصف القطب ، وهي تزداد بمقدار % 50 تقريبا
عند حدى القطب .

بالنسبة للآلات التوربينية يمكن استخدام النسبة الآتية لتحديد قيمة δ_0 :

$$\frac{\delta_0}{\tau_p} = 0.2 \frac{AC}{B_a} \dots\dots\dots (٨-١٦ ب)$$

وعموما فإنه في حالة الآلات التي يكون قطرها كبيرا ، وهي التي يكون عدد
الاقطاب فيها 24 أو أكثر ، نستطيع تحديد طول الثغرة الهوائية من المعادلة :

$$\delta_0 \geq 0.001 D \text{ cms } \dots\dots\dots (٩-١)$$

عرض الفك فوق اسنان المنتج :

لتحديد القطر الخارجى للمنتج نحتاج إلى تحديد عرض الفك فوق أسنان
المنتج، على أساس قيمة متوسطة لكثافة الفيض المغناطيسى فى مقطع هذا الفك ،
وتراوح هذه القيمة فى الحدود من 10000 خط/سم^٢ إلى 14000 خط/سم^٢. ويمكن
الحصول على سمك الفك B_y باعتبار أن $\frac{\Phi}{2}$ خط تمر فيه بالكثافة B_y ، وذلك من
المعادلات الآتية :

$$\frac{\Phi}{2} = B_a \frac{\tau_p}{2} l_i = B_y k_{ia} l h_y$$

$$h_y = \frac{B_a}{B_y} \cdot \frac{\tau_p}{2} \cdot \frac{l_i}{k_{ia} l} \dots\dots\dots (٦-١٠)$$

ابعاد القطب :

سبق أن بينا في الباب الثاني أننا نهتم اهتماما كبيرا بأن يكون شكل المنحنى المجال المغناطيسى للأقطاب الرئيسية جيديا ، أو أقرب ما يكون إلى ذلك ، لأننا نستفيد بضغط التوافقية الأساسية لهذا المنحنى فقط ، بينما ينتج عن ضغط التوافقيات العليا فيه زيادة في المفقدات . ويمكن تحقيق ذلك عن طريق تغيير طول الثغرة الهوائية على مدى الخطوة القطبية ، وذلك باعطاء حذاء القطب شكلا خاصا ، يتحدد بناء على أطوال الثغرة الهوائية عند النقط المختلفة بين حدى القطب ، كما يتضح من شكل (٦-٣) ، حيث يمكن تحديد الأطوال δ_x بدلالة δ_0 من المعادلة :

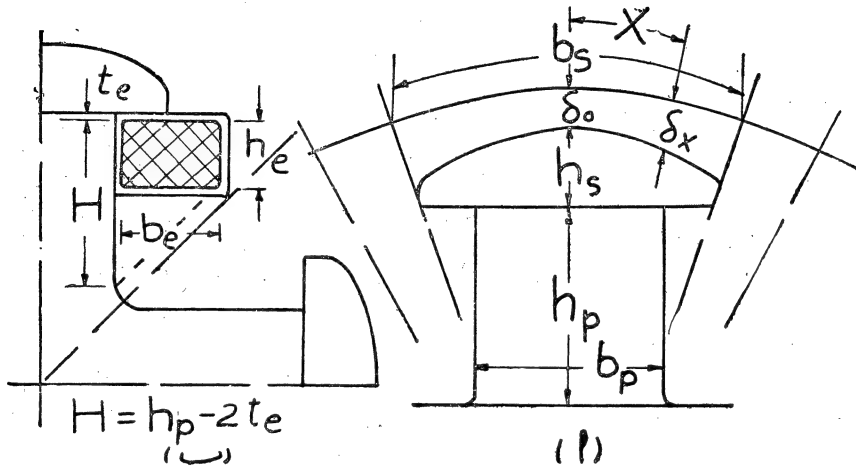
$$\delta_x = \frac{\delta_0}{\cos \frac{\pi}{\tau_p} x} \dots\dots\dots (٦-١١)$$

هذا وتحدد نهايتا الحذاء على الجانبين بناء على نسبة طول قوس الحذاء b_s إلى الخطوة القطبية τ_p ، فى الحدود الآتية :

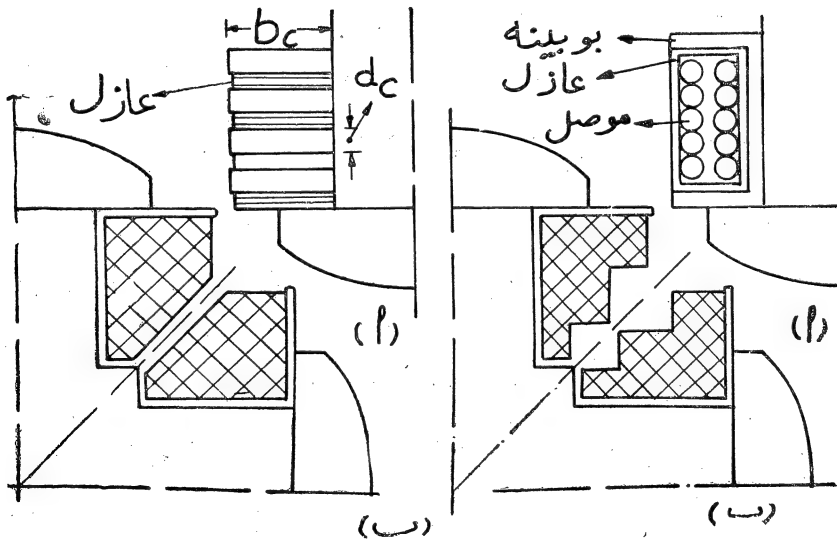
$$0.55 \leq \frac{b_s}{\tau_p} \leq 0.8 \dots\dots\dots (٦-١٢)$$

وتتأثر هذه النسبة بارتفاع الحذاء h_s ، فع مراعاة هذا الارتفاع يجب أن تقل قيمة النسبة كلما قل عدد الأقطاب ، وصغر محيط الآلة عند الثغرة الهوائية (Bohr circumference) . فإذا ما تحددت قيمة هذه النسبة ، على هذا الأساس ،

يمكن تحديد ارتفاع حذاء القطب h_p من الرسم ، كما هو مبين في شكل (٣-١٦) .
ويتراوح هذا الارتفاع في المتوسط بين 3 سم و 6 سم تقريبا .



شكل (٣-١٦)



شكل (٤-١٦)

يحدد عرض قلب القطب b_p بناء على قيمة الفيض المغناطيسى في قلب القطب ϕ_p ، الذى يزيد عن الفيض فى الشغرة الهوائية ϕ بحوالى 20% ، بفعل التسرب عند الحمل للكامل ($\phi_p \approx 1.2 \phi$) ، وعلى طول القطب l_p ، الذى تحدد من قبل (عند تحديد l_i) ، وكذلك على قيمة كثافة الخطوط المغناطيسية المسموح بها B_p ، والى تتراوح بين 12000 خط/سم² و 16000 خط/سم² ، وذلك باستخدام المعادلة الآتية :

$$b_p = \frac{\phi_p}{B_p l_p} \text{ cms} \quad \dots\dots\dots (١٣-٦)$$

يتوقف ارتفاع القطب h_p على طريقة ترتيب ملفات المجال على الأقطاب ، بشرط الاستفادة من الفراغ بين الأقطاب أقصى استفادة مستطاعة . بالرجوع إلى شكل (٣-٦) نجد أن هذا الشرط يتحقق عندما تكون مساحة النحاس $f_e h_e b_e$ أكبر ما يمكن ، حيث f_e هى المعامل الفراغى (space factor) للملفات . وهو نفس المعامل الذى سبق تعريفه بالنسبة للملفات المجال فى آلات التيار المستمر ، الذى هو عبارة عن النسبة بين مساحة مقاطع موصلات النحاس فى مقطع الملفات ، ومساحة هذا المقطع نفسه . وباعتبار أن t_e هو سمك العازل على الملفات (يمكن فرض قيمة t_e حوالى 3 مم تقريبا) ، نجد أن :

$$f_e h_e b_e = f_e h_e [(h_p - 2t_e) - h_e] \tan \frac{\pi}{2p} \quad \dots (١٤-٦)$$

تبلغ قيمة f_e حوالى 0,65 فى حالة استخدام موصلات دائرية المقطع ، بينما تصل إلى حوالى 0,85 عند استخدام الموصلات مستطيلة المقطع القائمة على جانبيها فوق القطب .

بمفاضلة المعادلة (١٤-٦) بالنسبة لـ h_e والمساواة بالصفز على الشرط

اللازم لتحقيق الاستفادة من الفراغ بين الأقطاب أقصى استفادة ممكنة :

$$h_e = \frac{1}{2} (h_p - 2t_e) \quad , \quad b_e = h_e \tan \frac{\pi}{2p} \dots\dots\dots (١٥-٦)$$

لكي يمكن تحديد قيمة مناسبة لـ h_p يجب معرفة كيف يكون ترتيب الملفات ، وطريقة وضعها على الأقطاب أولاً ، ثم تحديد قيمة معينة ومناسبة لـ b_e وبالتالي h_e .

ترتيب ملفات المجالي :

يتم في الغالب تجهيز الملفات قبل وضعها على الأقطاب بلفها على بويينة (bobin) ، يصنع جسمها من رقائق الحديد أو الزنك ، ولها شفتين (two flanges) مصنوعتين من من الحديد أو الزنك أو البرونز ، وذلك لكي تكون أسهل صنماً ، ولكي يمكن تغييرها عند حدوث أى تلف بها شكل (٤-١٦) هذا ويكون مقطع الموصل في الملفات إما دائرياً أو مستطيلاً . ويستخدم المقطع الدائري في الملفات عندما تكون المساحة صغيرة ، وفي هذه الحالة يمكن تدريع الملفات ، كما هو مبين في شكل (٤-١٦ ب) لكي تزيد فاعلية التهوية بزيادة سطح الملفات المعرض للجو الخارجى ويستخدم المقطع المستطيل إذا زادت المساحة عن الحد الذى يسمح باستعمال المقطع الدائري . وفي هذه الحالة يلف الموصل على البويينة قائماً على جانبه الضيق ، ويكون عزل الملفات ، عن بعضها البعض ، بالورق أو الميكانيك ، بين الطبقات المتتالية فقط ، بحيث يظل سطحها الخارجى معرضاً للهواء ، لكي تزيد فاعلية التهوية ، كما هو واضح في شكل (٤-١٦ أ) . وتكون أبعاد الموصل في الحدود الآتية :

$$20 \leq b_e \leq 70 \text{ mms} \quad , \quad d_e \geq 0.5 + 0.01 b_e \text{ mms} \dots\dots\dots (١٦-٦)$$

ويفضل عدم ادخال مجارى للتهوية بين مقاطع الملفات على الأقطاب عادة ،

وذلك بسبب الصعوبة البالغة التي تعترض عمل مثل هذه المجارى . ويكتفى في الغالب بزيادة فاعلية التهوية بالطرق المذكورة أعلاه ، مع استخدام الهوايات لزيادة حجم هواء التبريد .

يفضل استخدام المقطع المستطيل ، القائم على جانبه الضيق ، في ملفات المجال في الآلات البارزة ، التي يكون عدد الأقطاب فيها صغيراً . ذلك لأن درجة الاستفادة من مثل هذه الآلات تتوقف على فاعلية ملفات المجال ، في هذه الحالة ، لسببين : الأول أنه يمكن زيادة درجة الحرارة النهائية ، التي يسمح بتشغيل الملفات عندها ، خمس عشرة درجة تقريباً عن الحالات التي تستخدم فيها الموصلات ذات المقطع المستدير ، والثاني أنه على الرغم من سوء استغلال الفراغ بين الأقطاب عند استخدام المقطع المستطيل القائم على جانبه ، عندما يقل عدد الأقطاب في الآلة ، تكون القوة الدافعة المغناطيسية ، التي نستطيع ترتيبها على كل قطب ، بهذه الطريقة ، أكبر من تلك التي نحصل عليها باستخدام المقطع الدائري .

أما بالنسبة للآلات التي يكون عدد الأقطاب فيها كبيراً ، والتي تتوقف درجة الاستفادة منها على المنتج نفسه ، فيستخدم عادة المقطع المستدير ، ونقل درجة حرارة الملفات النهائية عن الدرجة المسموح بها ، حيث يتم تصميم الملفات على أساس أقل قيمة للنفقودات التي تبددها على شكل حرارى ، وذلك لكي يقل تأثيرها على معامل جودة الآلة .

يلف الموصل ، القائم على جانبه الضيق ، دون بوبينة عادة ، على قلب القطب المعزول مباشرة ، ويتم كبسه على القطب تحت ضغط كبير ، مع تجميعه داخل الفرن ، بحيث يصبح القطب والملف جسماً واحداً ، لا تؤثر عليه القوة الطاردة المركزية الناشئة عن الدوران ، شكل (٤ - ٦ أ) .

تحديد مساحة مقطع الموصل وضغط التنبيه :

إذا فرضنا أن :

q_c mm² مساحة مقطع الموصل في ملفات المجال بالمليمترات المربعة

V_c V ضغط التنبيه الموصل إلى ملفات المجال بالفولت

l_m m الطول المتوسط لكل لفة من ملفات المجال بالمتر

الحرارة النوعية لمادة الموصل عند درجة الحرارة النهائية أوم م²/م

ρ ohm. mm²/m

AT_p اللمبير لفات على كل قطب رئيسي عند الحمل الكامل

AT_a أمبير لفات رد فعل المنتج لكل قطب

N_{si} VA القدرة الداخلية للآلة 3EI بالفولت أمبير

B_g lines/cm² قيمة النهاية العظمى لكثافة الفيض في الثغرة الهوائية خط/سم

نجد أن :

$$N_{si} = 3EI = 3IT_{ph} \times B_a \tau_p l_i f \times 4.44 \times 10^{-8} k_w$$

$$3IT_{ph} = \frac{2p \pi AT_a}{2 \sqrt{2} k_w}$$

$$N_{si} = \frac{2p \pi AT_a}{2 \sqrt{2} k_w} \times \sqrt{2} \pi \times \frac{2}{\pi} B_g \tau_p l_i f k_w \times 10^{-8}$$

$$N_{si} = 2p \pi AT_a B_g \tau_p l_i f \times 10^{-8} \dots\dots (١٧-٦)$$

$$AT_a = \frac{N_{si} \times 10^8}{2p \pi B_g \tau_p l_i f} \dots\dots\dots (١٨-٦)$$

$$p_e = \frac{\rho l_m \times 2p AT_p}{V_e} = \frac{\rho l_m \times 2p}{V_e} \cdot \frac{AT_p}{AT_a} \cdot AT_a$$

$$= \frac{AT_p}{AT_a} \cdot \frac{\rho l_m N_{si} \times 10^8}{\pi B_g \tau_p l_i f V_e} \dots\dots\dots (٦-١٩)$$

بالتعويض في المعادلة (٦-١٩) بالقيم التقريبية التالية ، ووضع λ بدلا

من $\frac{l_i}{\tau_p}$ ، نجد أن :

$$l_m \approx 2l_i + \tau_p \text{ cms} , \quad B_g \approx 8000 \text{ lines/cm}^2$$

$$\frac{AT_p}{AT_a} \approx 2,0 , \quad \rho \approx 0.023 \text{ ohm. mm}^2/\text{m (at } 90^\circ\text{C)}$$

$$q_e \approx 1.84 \frac{(2\lambda + 1)}{f\lambda \tau_p} \cdot \frac{N_{si}}{V_e} \text{ mm}^2 \dots\dots\dots (٦-٢٠)$$

يتم تحديد ارتفاع القطب h_p من المعادلة (٦-١٥) ، وكذلك بعدى مقطع الملفات b_e و h_e ، في نفس المعادلة ، وبعدى الموصل b_e و d_e ، في المعادلة (٦-١٦) ، ومساحة مقطع الموصل q_e ، مع اختيار ضغط التنبيه المناسب V_e ، في المعادلة (٦-١٩) ، بحيث يمكن تنفيذ الملفات ، وتحقيق هذه المعادلات في نفس الوقت . ولكي يسهل عمل ذلك يمكن اعتبار سمك العازل الخارجى بين القطب والملفات حوالى 3 مم .

كثافة التيار والمفقودات النحاسية في ملفات المجال :

يتضح لنا من البند السابق أن حسابات ملفات المجال ، في الآلات المتزامنة ذات الأقطاب البارزة ، تتبع نفس الخط العريض ، الذى اتبع عند حساب ملفات المجال للمفات التوازي في آلات التيار المستمر . ويظهر ذلك بجلاء عند مقارنة الشق الأول من المعادلة (٦-١٩) ، التى بنيت على أساسها الحسابات

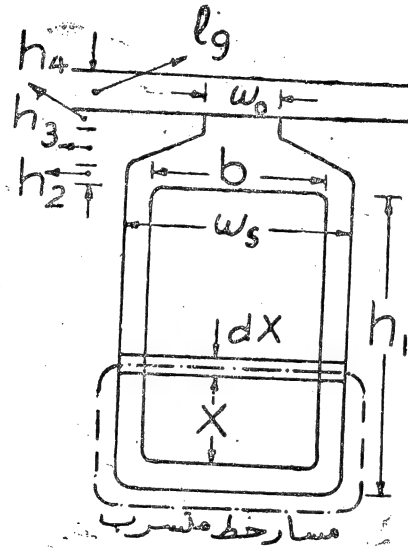
في الآلات المتزامنة، بالمعادلة (١٠-١٢) في كتاب هندسة الآلات الكهربائية ،
وهي التي بنيت على أساسها الحسابات في ملفات التوازي . وعلى هذا الأساس
نستطيع تحديد المفقودات الكلية في ملفات المجال ، والمفقودات النوعية ، التي
يبددها السطح المعرض للجو الخارجي ، بدلالة أبعاد الملفات وكثافة التيار في
هذه الملفات ، بنفس الطريقة التي اتبعناها في حالة ملفات التوازي في آلات التيار
المستمر ، فنحصل على معادلات عمالة للمعادلات (٨-١٢) ، (٩-١٢) ، (١١-١٢)
(١٢-١٦) ، في كتاب هندسة الآلات الكهربائية . وتراوح قيمة كثافة
التيار في ملفات المجال ، بالنسبة للآلات المتزامنة ذات الأقطاب البسارزة ، بين
2,5 أمبير/مم² و 3,5 أمبير/مم² . أما في الآلات التوربينية فيمكن زيادة هذه
الكثافة إلى 4,5 أمبير/مم² ، كما أن حاصل ضرب كثافة التيار في ملفات المجال
والحل النوعي الكهربائي يكون محدودا في الآلات التوربينية أيضا بالحدين من
1500 إلى 3500 .

حساب المقاومة وممانعة التسرب المرحلية :

يكون حساب المقاومة على أساس مساحة مقطع الموصلات ، والطول المتوسط
لكل لفة في ملفات المنتج ، الذي نحصل عليه من الرسم ، وذلك عند درجة حرارة
التشغيل المعتادة للآلة . ثم تزداد قيمة المقاومة بنسبة معينة لأخذ الظاهرة القشرية
(skin effect) ، وتأثيرها على المفقودات النحاسية ، عندما يكون التيار مترددا .
ويتم ذلك بضرب المقاومة ، التي نحصل عليها بالطرق العادية $(R = \rho \frac{l}{a})$
في معامل الظاهرة القشرية K_d ، وهو دالة لعمق الموصل h_c في إتجاه عمق المجرى ،
ونسبة عرض النحاس العاري في المجرى إلى عرض المجرى α ، على النحو
التالي :

$$K_d \approx 1 + \frac{4}{45} (h_c \alpha_s)^4 \dots\dots\dots (٦-٢١)$$

$$\alpha_s \approx \frac{\text{العماري عرض المجرى}}{\text{عرض النحاس}} \sqrt{V} = \sqrt{\frac{b}{\omega_s}} \quad \text{شكل (٦-٥)}$$



شكل (٦-٥)

ويراعى أن تكون قيمة α_s h_c أقل من 0,7 حتى يمكن تطبيق المعادلة (٢١) - (٦). وإلا فمن الواجب تقسيم الموصل إلى شرائح يفصل بينها عازل ، ويكون عمق الشريحة بحيث تكون قيمة α_s h_c للشريحة أقل من 0,7 .

أما بالنسبة لممانعة التسرب المرحلية فإنها تحسب على أساس حساب الفيض المغناطيسي المتسرب حول المجارى ϕ_s ، والفيض المغناطيسى حول الاطراف المعلقة لللفات ϕ . ويمكننا حساب قيمة كل من ϕ_s و ϕ_0 بحساب قيمة السماح المغناطيسى (permeance) ، لمسار كل منهما ، وضربه في الامبير لفات التى تدفعه في هذا المسار ، كما سبق أن فعلنا في آلات التيار المستمر . وسوف نستفيد

في الواقع من النتائج التي حصلنا عليها هناك ، تفاديا لإضاءة المجهود في التكرار .

قياسا على المعادلة (١٨-١٢) ، صفحة ٥٧٩ في كتاب هندسة الآلات الكهربائية ، نجد أن السباح المغناطيسي λ_s لمسار الفيض ϕ_s المتسرب حول المجرى ، المبين أبعاده في شكل (٥-٦) ، لكل سنتيمتر واحد من طول حديد المنتج هو :

$$\lambda_s = \frac{h_1}{3\omega_s} + \frac{h_2}{\omega_s} + \frac{2h_3}{\omega_s + \omega_o} + \frac{h_4}{\omega_o} + \frac{l_g}{\tau_s} \quad (٦-٢٢)$$

وتكون قيمة النهاية العظمى للفيض المغناطيسي المتسرب حول المجارى

هى :

$$\phi_s = 0.4 \pi \sqrt{2} I u \times 2 l_a \lambda_s = 3.55 I u \lambda_s l_a \dots (٦-٢٣)$$

حيث l_a هى طول حديد المنتج بالسنتيمترات . وتستخدم معادلة تجريبية لحساب قيمة النهاية العظمى للفيض المغناطيسي ϕ_o المتسرب حول الاطراف المعلقة ، حيث :

$$\phi_o = k q I u l_o \dots \dots \dots (٦-٢٤)$$

k ثابت تكون قيمته حوالى 2,8 بالنسبة للملفات مفردة الطبقة ، وتكون قيمته 1,8 تقريبا بالنسبة للملفات مزدوجة الطبقة ، l_o هو طول الطرف المعلق لكل موصل ، ويمكن حسابه بعد تصميم الملفات .

كما يمكن حساب l_o أيضا بصورة تقريبية من المعادلة :

$$l_o \cong 2 \tau_p \left(1 + \frac{2 V \times 10^{-3}}{\tau_p} \right) \dots \dots (٦-٢٥)$$

حيث $V \times 10^{-3}$ هو ضغط الآلة المرحلى بالكيلوفولت .

ويمكن الحصول على نسبة هبوط الضغط بسبب ممانعة التسرب المرحلية ، وهي

$$\frac{IX_1}{E} ، بقسمة مجموع Φ_s و Φ_o على Φ الفيض المغناطيسى المناظر لكثافة$$

الخطوط المغناطيسية B_s في الثغرة الهوائية ، حيث :

$$\varepsilon = \frac{IX_1}{E} = \frac{\Phi_o + \Phi_s}{\Phi} = \frac{\Phi_o + \Phi_s}{B_a \tau l_i} \dots (٢٦-٦)$$

كما يمكن تعويض $(\Phi_s + \Phi_o)$ بدلا من Φ ، في معادلة القوة الدافعة

الكهربية ، للحصول على قيمة هبوط الضغط في ممانعة التسرب المرحلية عند الحمل

الكامل IX_1 .

حساب ملفات التخميد :

لا توجد قوانين ثابتة يمكن التعويل عليها في حسابات ملفات التخميد ، ونكتفي

بإعطاء بعض المعادلات التجريبية ، التي يمكن الاستفادة بها في هذا المضمار .

تكون مقاطع قضبان التخميد (damper bars) مستديرة ، ويوجد منها في

وجه حذاء كل قطب من خمسة إلى عشرة ، تبلغ مساحتها معا ما يساوى من 0,1

إلى 0,3 مساحة مقاطع موصلات المنتج لكل قطب ، كما تبلغ مساحة مقطع

الحلقة الطرفية (damper ring) ، التي تصلها معا ، نصف هذه المساحة تقريبا .

هذا وتكون القضبان عادة من البرونز لكي تعطى نفس المقاومة ، مع مساحة

مقطع أكبر ، مما يساعد على زيادة تبيد الحرارة من سطوحها .

مثال (١) : 625 KVA , 600 r.p.m., 3000 V

سوف نوجد قطر الآلة بالطرق المختلفة ، باستخدام المعادلات (٣-٦) ،

(٥-٦) ، (٥-٦) ، ويجب ملاحظة أن هناك تقريبات وقيم تجريبية في هذه المعادلات تجعل من الصعب الحصول على نفس النتيجة في كل مرة . ولكن يجب أن تتقارب النتائج على كل حال . ويتوقف ذلك بطبيعة الحال على مدى الدقة المنتظرة في القيم التجريبية المستخدمة . وتكون النتائج التي تعطىها المعادلة (٥-٦) عموماً أقل من المعادلتين الأخريتين ، لذلك يجب عدم استخدامها ، إلا عندما يراد معرفة المدى الذى يقع فيه قطر الآلة بالتقريب فقط .

أولاً - باستخدام المعادلة (٣-٦) : نفرض أن $B_a = 5400$ خط/مم^٢ وأن $AC = 310$ أمبير موصل/مم من محيط المنتج ، $k_w = 0.96$ مؤقتاً :

$$C_o = 0.183 \times 5400 \times 310 \times 0.96 \times 10^{-11} = 2.94 \times 10^{-6}$$

$$\epsilon \approx 0.12 , N_{sN} = 625 \times 10^3 \text{ VA}$$

$$N_{si} = 625 \times 10^3 (1 + 0.12 \times 0.6) = 670 \times 10^3 \text{ VA}$$

$$p = \frac{60 \times 50}{600} = 5 , \lambda = 0.5 \sqrt{5} = 1.12$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{10 \times 670 \times 10^3}{1.12 \times \pi \times 600 \times 2.94}} = 102.6 \text{ cms}$$

$$\tau_p = \frac{\pi \times 102.6}{10} = 32.3 \text{ cms} ,$$

$$l_i = 1.12 \times 32.3 = 36.2 \text{ cms}$$

ثانياً - باستخدام المعادلة (٥-٦) :

$$D = 12 + 1.3 \sqrt{\frac{85 \times 625 \times 5}{600 \times 1.12}} \approx 107.5 \text{ cms}$$

ثالثاً — باستخدام المعادلة (٥-٦) : (سوف نتخذ نتائجها أساساً لباقي الحسابات)

$$\tau_p = 5.3 + 2.025 \sqrt{\frac{670 \times 10^3}{5 \times 50 \times 1.12}} = 32.4 \text{ cms}$$

$$D = \frac{10 \times 32.4}{\pi} = 103 \text{ cms} , \quad l_1 = 36.3 \text{ cms}$$

باعتبار المنتج مكون من ستة قطاعات عرض كل منها $l' = 5.8$ سنتيمتراً يصبح مجموع أطوال قطاعات الستة $l = 34.8$ سنتيمتراً . يفصل بين القطاعات خمس فتحات تهوية عرض كل منها سنتيمتراً واحد ، وبذلك يكون الطول الكلي للمنتج هو $l_a = 39.8$ سنتيمتراً ($34.8 + 5 =$) . فإذا اعتبرنا أن طول القطب l_p يقل عن ذلك بحوالى 2 سنتيمتراً ، نجد أن $l_p = 37.8$ سنتيمتراً ، وهذا كله يتفق مع القاعدة بأن $l_1 = \frac{l + l_p}{2}$ ، حيث :

$$l_1 = \frac{34.8 + 37.8}{2} = 36.3 \text{ cms}$$

وهو ما يتفق مع النتيجة التى حصلنا عليها ، مما يجعل هذه الأطوال نهائية ، بحيث نعلم عليها بعد ذلك .

بمراجعة السرعة المحيطية عند سطح المنتج الداخلى v_a نجد أن :

$$v_a = \tau_p \text{ cms} = 32.4 \text{ m/sec.}$$

$$1.8 v_a = 32.4 \times 1.8 = 58.3 \text{ m/sec.} < 80 \text{ m/sec.}$$

بأخذ عدد المجارى لكل مرحلة تحت كل قطب $q = 4$ ، نجد أن عدد المجارى الكلية على الآلة هو $qp = 120$ ، $s = 6$ ، وتكون قيمة خطوة المجرى

$$\tau_s = \frac{\pi D}{S} = \frac{\pi \times 103}{120} = 2.7 \text{ cms (في الحدود)}$$

يمكن حساب عدد اللفات في كل مرحلة T_{ph} من معادلة القوة الدافعة الكهربائية مباشرة .

$$V = \frac{3000}{\sqrt{3}} = 1732 \text{ V} , E \approx 1.072 \text{ V} \approx 1860 \text{ V}$$

$$k_w = k_d = \frac{\sin 30}{4 \sin 7.5} = 0.957 \left(\alpha = \frac{360 \times 5}{120} = 15^\circ \right)$$

$$\therefore 1860 = 4.44 \times 50 \times T_{ph} \times 5400 \times 36.2 \times 32.4 \times 0.957 \times 10^{-8}$$

$$T_{ph} = 138 , U \approx \frac{138 \times 6}{120} \approx 6.9 = 7$$

بأخذ سبعة موصلات في كل مجرى نحصل على $T_{ph} = 140$ ، وهذا يستدعي تعديل B_p إلى 5320 جاوس بدلا من 5400 جاوس . كذلك يجب تعديل AC ، التي استخدمت في المعادلة (٣-٦) ، حتى لا تتغير النتائج التي حصلنا عليها عند استخدام هذه المعادلة ، فتصبح AC تساوي 315 بدلا من 310 $\left(315 = 310 \frac{5400}{5320} \right)$ وذلك حتى لا تتغير قيمة C_p .

إذا كنا سنعتمد على النتائج ، التي حصلنا عليها باستخدام المعادلة (٥-٦ أ) يجب أن نحسب AC على هذا الأساس ، حيث :

$$AC = \frac{IZ}{\pi D} , I = \frac{625 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3000} = 120 \text{ A}$$

$$AC = \frac{120 \times 120 \times 7}{\pi \times 103} = 312 \text{ ampcond./cm}$$

يجب المراجعة على قيمة الأمبير موصلات I_u في كل مجرى ، ويجب ألا تزيد هذه القيمة عن 1500 .

$$I_u = 120 \times 7 = 840 \ll 1500$$

لكي يمكن المراجعة على كثافة الخطوط المغناطيسية عند أضيق مقطع في السنة، يجب أولاً حساب أبعاد المجرى ، ونبدأ بتحديد مساحة مقطع موصلات المنتج ، على أساس قيمة معينة لكثافة التيار ، ولتكن $\delta_a = 3.5$ أمبير/مم² ($1800 > \delta_{AC} = 3.5 \times 312 = 1100$)

$$q = \frac{120}{3.5} = 34.3 \text{ mm}^2$$

بدلاً من تحديد بعدى الموصل ، ثم المراجعة على كثافة الفيض ، نحدد عرض السنة المناسب عند سطح المنتج b_t على قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط في الأسنان B_{tm} ، باستخدام المعادلة (٦-٦) ، ثم نحدد بناء على ذلك بعدى الموصل ، على النحو التالي :

بفرض أن قيمة B_{tm} المسموح بها هي 18500 خط/مم² وأن $\alpha = \frac{2}{\pi}$ و $k_{ia} = 0.9$ ، نجد أن :

$$b_t = \frac{36.3 \times 5320 \times \pi \times 2.7}{0.9 \times 34.8 \times 2 \times 18500} = 1.4 \text{ cms}$$

$$b_s = 2.7 - 1.4 = 1.3 \text{ cms}$$

باعتبار أن سمك العازل المستخدم لبطانة المجرى 2 مم ، وسمك العازل على الموصل نفسه يزيد في عرضه 1 مم ، والفضضة في عرض المجرى حوالى 0,5 مم (هندسة الآلات الكهربائية صفححة ٥٥٥ إلى صفححة ٥٦١) ، يكون عرض

الموصل العارى ، الذى يدخل فى المجرى بعرضه السابق ، هو 7.5 مم . بعمل حساب زيادة المساحة ، الناتجة عن ضرب بعدى الموصل فى بعضهما ، نتيجة لاستدارة الجوانب ، نجد أن عمق الموصل ، فى اتجاه عمق المجرى هو d :

$$d = \frac{34.3}{0.9 \times 7.5} \approx 5.1 \text{ mm}$$

تزداد هذه القيمة 1 مم لآخذ حساب العازل حول الموصل فى الحساب ، فتصبح 6.1 مم للموصل المعزول ، ويكون عمق الموصلات السبعة 42.7 مم . بالرجوع إلى شكل (١-٦) نجد بالنسبة للمجرى نصف المقفل أن :

$$h' = 42.7 \times \frac{7}{6} = 50 \text{ mms} , \quad \frac{a}{4} = 3.25 \text{ mms}$$

$$\frac{a}{10} = 1.3 \text{ mm} , \quad 9.75 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 2.82 \text{ mms}$$

$$h = 50 + 1.3 + 2.82 = 54.12 \text{ mms}$$

بمراجعة قيمة $\frac{h}{a}$ نجد أنها تساوى $\left(4.15 = \frac{54.12}{13}\right)$ وهى فى الحدود المسموح بها تقريبا .

لإيجاد سمك الفك h_y فوق الأسنان نستخدم المعادلة (١٠-٦) ، بفرض أن B_y يساوى 12500 خط/سم^٢

$$h_y = \frac{5320}{12500} \times \frac{32.4}{2} \times \frac{36.3}{0.9 \times 34.8} = 8.05 \text{ cms}$$

لنحدد طول الثغرة الهوائية δ_0 عند منتصف القطب نستخدم المعادلة (٨)

(٦ ب -)

$$\delta_o \approx 0.3 \frac{312}{5320} \times 32.7 = 5.7 \text{ mms} \approx 6 \text{ mms}$$

نستطيع بعد ذلك تحديد شكل منحنى حذاء القطب بتحديد طول الفقرة الهوائية عند النقط المختلفة باستخدام المعادلة (١١-٦) . أما طول قوس الحذاء b_s فيحدد باستخدام المعادلة (١٢-٦) بفرض قيمة للنسبة $\frac{b_s}{r_p}$ تساوى حوالى 0.64 حيث

$$b_s \approx 0.64 \times 32.4 = 20.75 \text{ cms}$$

بفرض أن الفيض المغناطيسى فى القطب ϕ_p عند الحمل الكامل 1,2 من قيمة ϕ وبفرض أن كثافة الخطوط المغناطيسية تساوى حوالى 16000 خط/سم فى هذه الحالة نجد أن

$$\phi_p = 1.2 \times 5320 \times 32.4 \times 36.3 = 7.5 \times 10^6 \text{ خط}$$

$$b_p = \frac{7.5 \times 10^6}{16000 \times 37.8} = 12.4 \text{ cms}$$

يمكن بعد ذلك الحصول على سمك الحذاء h_p بعمل الرسم المبين فى شكل (٣-٦ أ) . ونحتاج فى هذه الحالة إلى تحديد ارتفاع القطب h_p أولاً . وهذا يستلزم تصميم ملفات المجال ، مع تحديد قيمة ضغط التثبيته V_c ، الذى نفرض أنه يساوى 50 فولت باستخدام المعادلة (٢٠-٦) نجد أن

$$q_c = 1.84 \frac{(2 \times 1.12 + 1)}{50 \times 1.12 \times 32.4} \cdot \frac{670 \times 1000}{110} = 44 \text{ mm}^2$$

$$b_c = 35 \text{ mm} , \quad d_c = 1.25 > 0.5 + 0.01 b_c (= 0.85)$$

يضاف حوالى 0,25 مم إلى h_c لآخذ سمك العازل فى الحسبان ، فيصبح عمق الموصل المعزول 1,5 مم . وبفرض أن كثافة التيار لاتتعدى حوالى 3 أمبير/مم² تكون أقصى قيمة لتيار التنبيه هي :

$$I_{fm} = 3 \times 44 = 132 \text{ amps}$$

فاذا اعتبرنا أن أقصى قيمة للأمبير لفات $AT_p^{(1)}$ على الانطاب تبلغ حوالى $2.2 AT_p$ نجد أن :

أمبير لفه/قطب

$$AT_p = 2.2 \times 1.35 \times \frac{140}{5} \times 120 \times 0.957 = 9550$$

وهذا يحدد عدد اللفات على كل قطب T_c ، حيث :

$$T_c = \frac{9550}{132} = 73 \text{ لفة}$$

ويكون الارتفاع اللازم لإستيعاب هذه اللفات h_c هو

$$h_c = 73 \times 1.5 = 110 \text{ mms}$$

بالمراجعة على المعادلة (١٥-٦) نجد أن

(١) بعد تحديد أبعاد الآلة الرئيسية ، باستخدام هذه الأرقام التقريبية ، نستطيع رسم معنى التفضيل الآلة ، بفرض قيم مختلفة للفيض ، وتحديد تيارات التنبيه المناظرة (أو الأمبير لفات اللازمة لدفع الفيض فى الدائرة المغناطيسية للآلة) وكذلك القوة الدافعة الكهربائية B . ثم نحدد قيمة AT_p برسم مخطط المنحنيات كما جاء فى الباب الثالث ، ومن ثم نحدد I_{fm} ونراجع على كثافة التيار .

$$b_e = 110 \tan 18 = 110 \times 0.3249 = 35.7 \approx b_c$$

كذلك نحصل باستخدام الشق الآخر من المعادلة على h_p ، حيث

$$h_p = 2h_e + 2t_e = 220 + 4 = 224 \text{ mms}$$

نحصل عن سمك حذاء القطب باستخدام الرسم المبين في شكل (٣-٦) ، ونجد في هذه الحالة أن هذا السمك يساوى 4 سنتيمترا تقريبا .

لحساب مقاومة المنتج وممانعة التصرب المرحلية يجب أولا حساب معامل الظاهرة القشرية K_d وطول الطرف المعاك للموصل l_o ، باستخدام المعادلتين (٦-٢١) ، (٦-٢٥) .

ويلاحظ أن قيمة K_d مع الموصل الذى عمقه 5,1 مم سوف تكون كبيرة بصورة غير محتملة ، لذلك يجب تقسيم الموصل إلى ست شرائح (١) سمك كل منها $\frac{5,1}{6} = 0,85$ ، وعزلها عن بعضها البعض بطبقة رقيقة جدا من العازل

$$\alpha_s \approx \sqrt{\frac{7.5}{13}} \approx 0.76 \quad h_c = 0.85 \text{ mm}$$

$$K_d \approx 1 + \frac{4}{45} (0.85 \times 0.76)^4 \approx 1.0153$$

$$R_a = 1.0153 \times \frac{0.023}{34.3} \times \frac{280}{100} (39.8 + l_o)$$

$$l_o \approx 2 \times 32.4 \left(1 + \frac{2 \times 1732}{32.4} \right) \approx 71.6 \text{ cms}$$

(١) راعينا في هذا التقسيم ألا تزيد قيمة $\alpha_s h_c$ عن 0,7 لأن المعادلة (٦-٢١)

لا يمكن تطبيقها على الحالات التى تزيد فيها قيمة $\alpha_s h_c$ عن 0,7 .

$$R_a = 0.212 , \quad \frac{I R_a}{V} \times 100 = 1.47 \%$$

بالرجوع إلى شكل (٦-٥) ، ومقارنته بالشكل (٦-١) ، نجد أن الأبعاد،
اللازمة للتمريض في المعادلة (٦-٢٢) في حالتنا هذه ، هي

$$h_1 = 41.7 , \quad h_2 = 4.15 , \quad h_3 = 2.82 , \quad h_4 = 1.3 \text{ mm}$$

$$\omega_o = \frac{a}{4} = 3.25 , \quad \omega_s = a = 13 \text{ mm}$$

$$\lambda_s = \frac{41.7}{3 \times 13} + \frac{4.15}{13} + \frac{2 \times 2.82}{13 + 3.25} + \frac{1.3}{3.25} \\ + \frac{6}{324} = 2.1555$$

بتطبيق المعادلتين (٦-٢٣) ، (٦-٢٤) للحصول على ϕ_o ، ϕ_s :

$$\phi_s = 3.53 \times 120 \times 7 \times 2.1555 \times 39.8 = 0.256 \times 10^6 \text{ خط}$$

$$\phi_o = 2.8 \times 4 \times 120 \times 7 \times 71.6 = 0.672 \times 10^6 \text{ خط}$$

بالتمريض في المعادلة (٦-٢٦) للحصول على نسبة هبوط ضغط مسانعة

التسرب :

$$\varepsilon = \frac{IX_1}{E} = \frac{(0.256 + 0.672) \times 10^6}{5320 \times 36.3 \times 32.4} = \frac{0.928}{6.25} \\ = 0.148$$

مسائل على الباب السادس

- 1 — Determine approximate stator core dimensions for a 23400 — KVA, 50 cycle, 3—Phase turbo — alternator, under the following limitations : Mean gap density, 5000 Lines per cm^2 , ampere — conductors per cm of periphery, 560, peripheral speed, 144 m per sec., air gap, 3 cm.
- 2 — Prove that the KVA — rating of synchronous machine is equal to $10.4 \bar{B} \text{ ac } D^2 L n 10^{-11}$, when \bar{B} , ac, D, L and n are the mean value of the flux density over the pole — pitch, the ampere — conductors per cm of periphery, the diameter and length of the stator in cm, and the rev. per sec. respectively. Assuming that the winding is uniformly distributed and has a 60° phase-spread, determine approximately the diameter and length of the stator of a 2500 — KVA, 50 — cycle, 2 — pole, turbo alternator, given : $\bar{B} = 4500$, ac = 250, airgap = 2 cm. The peripheral speed must not exceed 100 cm per sec.
- 3 — A 2 — pole 3000 — rev. per min. alternator has a core length of 1.5 m. selecting the following values for the mean flux — density over the pole pitch \bar{B} , the ampere — conductors — per cm ac, and the peripheral speed v, determine the output obtainable from the machine : $\bar{B} = 5000$ lines per cm^2 , ac per cm = 260, v = 100 m per sec.
- 4 — Determine approximate stator core dimensions for a 23400 K.V.A., 50 cycle, 3 phase turbo — alternator

(2 pole) under the following limitations ;

Mean gap density 5000 lines/cm²

Ampere — conductors per cm. of periphery 500

Peripheral speed 144 m/sec.

Air gap 3 cm.

- 5 — A 2 pole, 3000 R.P.M. alternator has a core length of 1,5 meter. Selecting the following values for the mean flux density over the pole pitch, the ampere — conductors per cm & the peripheral speed, determine the output obtainable from the machine :

Mean flux density 5000 lines/cm²

Ampere — conductor/cm 250

Peripheral speed 100 m/sec.

- 6 — Determine the leading dimensions of a 3 phase, 1500 K.V.A., 0,8 P.F., 3000 volts, 50 cycle alternator to run at a speed of 375 r.p.m. if the peak flux density in the air gap is about 9000 gauss & the specific electric loading 375 ampere-conductor/cm approximately Find the slots per pole per phase, number of conductors per slot & size of each slot.

- 7 — Determine the main dimensions, no. of slots & conductors/slot for a water wheel alternator from the following particulars ;

10000 K.V.A., 125 r.p.m. 0.8 P.F., three phase, star connected, 6600 volts, 25 cycle. Max. peripheral speed not to exceed 70 m/sec. at 95 % overspeed. Assume mean flux density 5800 lines/cm² & ampere

— conductor/cm 320 approximately.

- 8 — A 3 phase alternator giving 800 K.V.A. at 2300 volts, 300 r.p.m., 50 cycle has a stator bore of 190 cms diameter & a core length of 24 cms.

Using data obtained from this machine design an alternator to give 1200 K.V.A. at 3300 volts, 250 r.p.m., 50 cycle. Find also the number of slots and of conductors per slot and the approximate dimensions of the conductors.

- 9 — Determine the size of conductors & the number of turns required on each pole of the field winding of a 20 pole alternator from the following data ;

max. excited voltage 110 volts

ampere turns/pole 9000

dimensions of rectangular pole 14×28 cm.

available winding length/pole 15 cm.

thickness of insulation between conductors 0.02 cm.

the windings on all poles are in series.

- 10 — Deduce an expression for the output coefficient for a 3 phase dynamoelectric machine and use this expression to determine the diameter and length of core and number of slots for a 3 phase star connected alternator to give : 1200 KVA 3300 V 50 c.p.s at 0.8 power factor lagging at a speed of 500 r.p.m.

Assume maximum flux density in gap = 9000 lines per cm square, and ampere conductors per cm of

periphery = 350.

Give reasons for the values chosen.

- 11 — Deduce an expression for the output coefficient for a 3 phase dynamo — electric machine and use this expression to determine the diameter and length of core and number of slots for a 3 phase star connected alternator to give :
- 100 K.V.A., 550 volts, 50 c.p.s.: 1500 r.p.m., assuming an electric loading of 300 A.C./cm. and average air gap induction of 6000 gauss. Give reasons for the values chosen.
- 12 — A three phase alternator having a full load rating of 1000 KVA at 0.8 power factor, 2200 volts, 50 c.p.s., 300 r.p.m has a stator diameter of 190 cms, core length of 30 cms and 180 slots. Using the information from this machine, with suitable modifications where required, determine the diameter, core length, number of slots and conductors per slot for a three phase machine to give 2000 KVA at 0.8 power factor, 6600 volts, 50 c.p.s. 600 r.p.m.
- 13 — Determine the main dimensions for 2500 KVA, 3 phase, 6600 volt, 50 c/s, 600 r.p.m., star connected salient pole synchronous machine. (gen.),

The specific magnetic loading is about 5000 gauss and the specific electric loading is about 400 amp. cond./cm and the current density is about 380 amp/sq. cm. The stator bore diameter can be taken four times the core length.

Determine the number of stator slots and the number of

conductors per slot.

If the field amp. turns at no load is assumed 1.2 times the armature reaction amp. turns at full load and if the cross and demagnetizing coefficients are taken 0.45 and 0.86, find the amp. turns necessary for the main field at full load 0.8 power factor lagging. Neglect stator resistance and leakage reactance.

- 14 — A 3 phase, 200 KVA 1000 V, star connected alternator has a frequency of 50 c/s at a speed of 750 r.p.m. The maximum flux density in the air gap is 7000 gauss and the electric loading is 240 ampere conductors/cm at a current density of 3 amps/mm². Find the diameter, length of armature, number of slots and number of turns per phase. If the reactance of each phase is 10 times the resistance and the field form contains a third harmonic with an amplitude of 10% of that of the fundamental, calculate the current circulating due to that harmonic in the armature winding when connected in delta. Assume the length of the overhang on both sides of each coil 3.5 times the length of the pole pitch. Take length of rotor = 0.5 diameter.

- 15 — Find the main dimensions for a 1500 KVA, 3 phase, 3300 V, 50 c/s, 375 R.P.M., star connected, salient pole synchronous generator. The specific magnetic loading is about 6000 gauss and the specific

electric loading is about 375 amp. cond./cm. The length of the stator core can be taken 1.25 times the pole

pitch. Determine also the number of stator slots and the number of conductors per slot.

If the field ampere turns at no load is assumed 1.2 times the armature reaction ampere turns at full load, and if the cross and demagnetising coefficients are taken 0.45 and 0.86, find the ampere turns necessary for the main field at full load, 0.8 power factor lagging. Neglect stator resistance and leakage reactance.

الباب السابع

القواعد الأساسية للمحول الكهربى

Basic principles of the electric Transformer

دواعى استخدام المحول وتكوينه الاساسى :

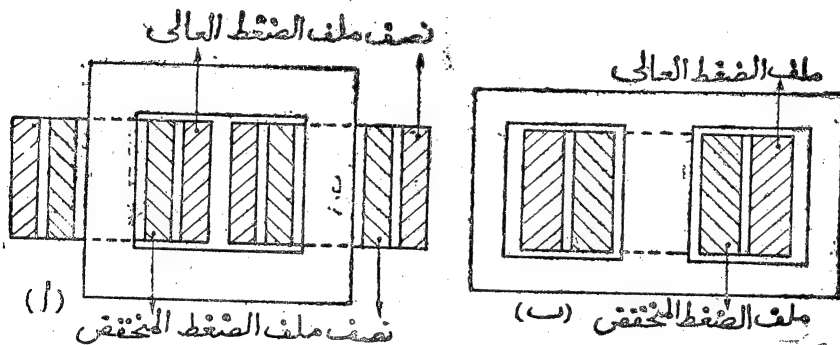
المحول الكهربى عبارة عن جهاز (أو آلة) يستخدم لخفض أو رفع الضغط الكهربى، لكمية من القدرة الكهربائية ، فى مقابل التضحية بأقل نسبة ممكنة من هذه القدرة ، يبددها المحول كخسائر ، على شكل طاقة حرارية ، كما يحدث فى كل الآلات . وقد بدأت الحاجة الملحة إلى استخدام المحول عندما تركز توليد القدرة الكهربائية ، بكميات هائلة ، فى محطات كبيرة ، للأسباب التى سبقت مناقشتها فى الباب الرابع ، وأصبح الأمر يستدعى نقل هذه القدرة إلى مواطن استخدامها ، مع تكبد أقل كمية ممكنة من الخسائر ، وبأقل ثمن ، وذلك عن طريق رفع الضغط إلى أقصى قيمة ، لخفض قيمة التيار ، وبالتالى تقليل حجم الموصلات ، عندما تعذر تهيئة الموصلات نفسها لإعطاء الضغوط بالقيم العالية المطلوبة . فبينما تقوم الموصلات بتوليد القدرة الكهربائية عند ضغط لا يزيد عادة عن 11 كيلوفولت (أقصى قيمة ممكنة توصلتها إليها حوالى 18 كيلوفولت) ، فإن نقل القدرة على ضغط تبلغ قيمته نصف مليون فولت ، كما هو الحال بالنسبة لكهرباء السد العالى ، لا يمثل منتهى الأمل فى هذا المضمار . هذا ، ومن ثم فقد أصبح استخدام المحولات لازماً أيضاً عند مواطن استعمال القدرة الكهربائية ، لخفض ضغط النقل العالى بما يناسب أجهزة الاستهلاك .

ويحتوى المحول الكهربى ، مثل الآلات الكهربائية الأخرى ، على دوائر كهربية ودوائر مغناطيسية ، كما تسرى الطاقة الكهربائية فى الدوائر الكهربائية بفعل تشابك الخطوط المغناطيسية بهذه الدوائر . ولكن لا توجد أجزاء دوارة فى المحول الكهربى ، ومن هنا ينشأ للفارق الجوهرى والأساسى بينه وبين الآلات الكهربائية الدوارة . إذ بينما تمثل القوة الدافعة الكهربائية الديناميكية المضادة ، المتولدة فى ملفات المنتج ، فى المحرك الكهربى ، رد الفعل الناشئ عن عزم الدوران المضاد للحمل ، على عمود إدارة المحرك ، فإن القوة الدافعة الكهربائية الإستاتيكية المضادة المتولدة فى الملف الابتدائى للمحول ، تمثل رد الفعل على هذه الدائرة ، الذى ينشأ عن طريقه سريان القدرة الكهربائية من الملف الابتدائى إلى الملف الثانوى ، ومن ثم إلى الحمل . ويصبح المحول ، بهذه الطريقة ، آلة كهربية استاتيكية (static electrical machine) يقوم عملها على أساس التأثير الكهرومغناطيسى (Electro-magnetic induction) ، وليس على أساس تحويل الطاقة الكهروميكانيكى (Electro - mechanical energy conversion) ، كما هو الحال فى الآلات الكهربائية الدوارة (rotating electrical machine) .

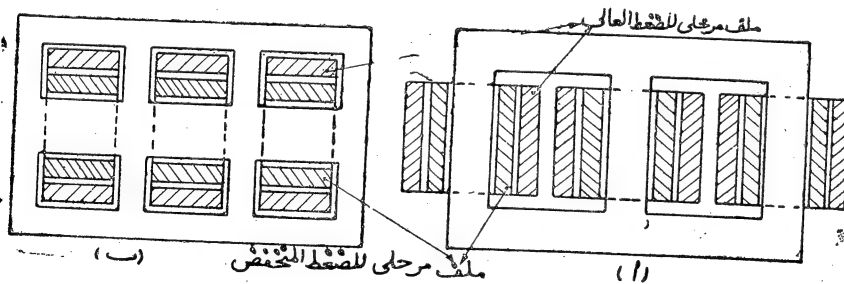
يتكون المحول الكهربى أساساً من ملفين معزول كل منهما عن الآخر كهربياً عزلاً تاماً ، بحيث يكون دائرة كهربية مستقلة . ويوصل أحدهما إلى الفيضوى الكهربى ، المراد تحويل ضغطه ، ويسمى لذلك بالملف الابتدائى (primary winding) بينما يوصل الآخر بالحمل ، ويسمى بالملف الثانوى (secondary winding) . ويسمى الملفان أحياناً بدلالة الضغط على كل منهما ، فيكون الملف ذو الضغط الأكبر هو ملف الضغط العالى (high voltage winding) ، والملف ذو الضغط الأصغر هو ملف الضغط المنخفض (low voltage winding) .

وتتوقف طريقة عمل المحول على نظرية التأثير المتبادل بين الملفين (effect of mutual induction) من حيث أن الفيض المغناطيسى ، الناشئ عن مرور تيار الينبوع في الملف الابتدائي ، حول هذا الملف ، يمكن أن يتشابك مع الملف الثانوي ، فيولد فيه قوة دافعة كهربية ، يمكن عن طريقها نقل بعض القدرة الكهربية إلى الحمل الموصل على طرفي هذا الملف . ويكون نقل القدرة الكهربية من الملف الابتدائي ، أو الينبوع ، إلى الملف الثانوي ، أو الحمل ، عن طريق المجال المغناطيسى ، الذى يتمثل في الفيض المغناطيسى المتبادل (mutual magnetic flux) ، المتشابك تماما مع كل من الملفين ، وهو ما يتوقف على معامل الإزدواج بينهما (coefficient of coupling) (بند ١٣ كتاب هندسة الآلات الكهربية صفحة ١٠٥ إلى صفحة ١١٠) . كذلك تم عملية التحويل بكفاءة أعلى ، كلما ازدادت قيمة معامل الإزدواج ، بحيث تصل العملية إلى قة الكفاءة ، عندما تكون هذه القيمة هى الواحد الصحيح . وهذا يستدعى أن تتشابك جميع خطوط الفيض المغناطيسى ، الذى ينشئه الملف الابتدائي ، مع الملف الثانوي ، وبالعكس . والطريقة المثلى ، للحصول على نتائج أقرب ما تكون إلى ذلك ، أن يوضع الملفان على قلب حديدى واحد ، تكون معاوقته المغناطيسية صغيرة جدا بالنسبة لمعاوقة مسار الخطوط المغناطيسية في الهواء ، بحيث يتركز سير هذه الخطوط في القلب الحديدى ، فيما عدا نسبة ضئيلة جدا ، تتوقف قيمتها على مدى تشبع هذا القلب بالخطوط ، ويطلق عليها اسم الفيض المغناطيسى المنسرب (leakage flux) . ويسمى المحول في هذه الحالة محول ذو قلب حديدى (iron cored transformer) ، ويتركز عيب وجود القلب الحديدى أساسا في المقودات الحديدية التى تحدث بداخله ، بسبب المجالات المغناطيسية المترددة ، الناشئة عن التيارات المترددة ، نظرا لأن المحول لا يقوم بوظيفته إلا مع الضغوط والتيارات المترددة ، التى

يمكن حدوث التأثير المتبادل في وجودها . هذا ويمكن التقليل من أثر العيب المذكور ، إلى أقصى درجة ممكنة ، بعمل القلب الحديدي من رقائق معزولة عن بعضها البعض ، لخفض قيمة مفقودات التيارات الإعصارية ، كما أن انخفاض قيمة التردد المستخدم عموما ، وهو 50 ذبذبة في الثانية ، يساعد على ذلك ، من هذه الناحية ، ومن ناحية تقليله لمفقودات التخلف المغناطيسي أيضا (هندسة الآلات الكهربائية من ص ٨٧ إلى ص ٩٧) . وهذا يعني حتمية عدم استخدام القلب الحديدي في المحولات ، التي تقوم بتحويل الضغوط ذات الترددات العالية ، مثل تلك التي تستخدم في دوائر الراديو ، إذ يكون مسار الخطوط المغناطيسية ،

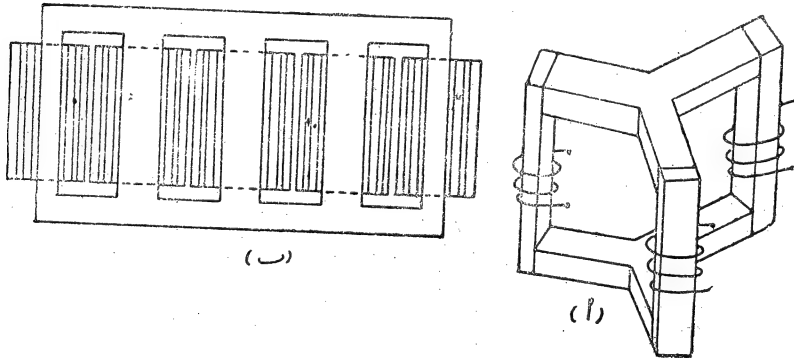


شكل (٧ - ١)



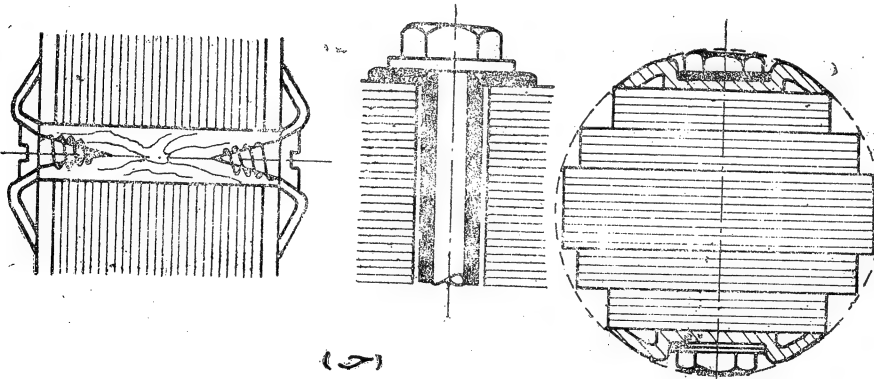
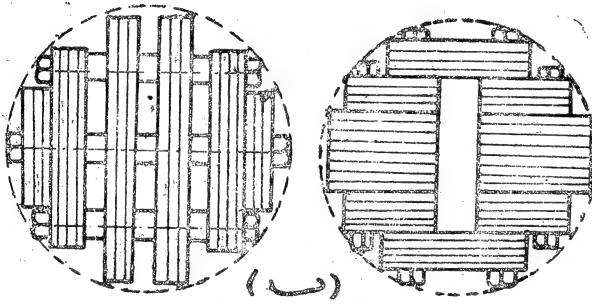
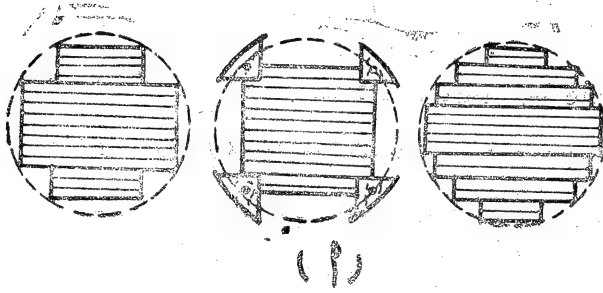
شكل (٧ - ٢)

في مثل هذه المحولات ، في مادة ذات معامل نفاذ مغناطيسي صغير ، مثل الهواء ،
ويطلق عليها اسم المحولات الهوائية (air cored transformer) .
يبين شكل (١-٧) ترتيب الملفات على القلب الحديدي لمحور مفرد أو
أحادي المرحلة (single phase transformer) . وهذا من نوع المحول
ذو القلب (core type transformer) وهو عبارة عن ساقين ، توضع
عليهما الملفات ، وفكين لتكملة القلب الحديدي . في ب من نفس الشكل نجد
النوع المسمى بالمحول الهيكل (shell type transformer) ، ويلاحظ أن مساحة
مقطع الساق الوسطى تكون ضعف مساحة مقطع كل من الساقين الطرفيين .
ولا يوجد أي فارق في الخواص الكهربائية لهذين النوعين ، وإنما يكون
الاختلاف فقط في أعداد الملفات ، وترتيبها على القلب الحديدي ، وهما الفيز
المغناطيسي في كل منهما ، وبعض الخواص الميكانيكية من ناحية القوى المؤثرة
على الملفات عند حدوث دائرة قصر فيها . في شكل (٢-٧ ، ب) نجد نوعي
المحول ثلاثي المراحل ، ونعني المحول ذا القلب ثلاثي المراحل 3-phase core
(type transformer) في أ ، الذي يتكون من ثلاثة سيقان ، يوضع على كل



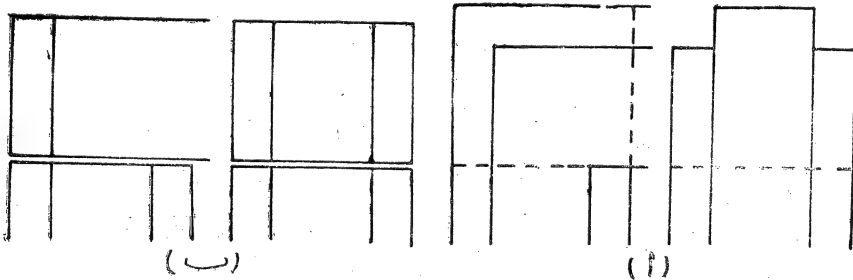
شكل (٢-٧)

منها مرحلة بملفها ، والمحول من النوع الهيكل في ب (3-phase shell type transformer) ، الذي يتكون ببساطة من ثلاثة محولات أحادية المرحلة من نفس النوع. ويلاحظ أن الخطوط المغناطيسية ، بالنسبة للمرحلة الموضوعة على



شكل (٤-٧)

الساق الوسطى للمحول ذى القلب ثلاثى المراحل ، أقصر من مساريها على الساقين
الطرفيين ، وهذا يؤدي إلى اختلاف في تيارات المحول بدون حمل ، كما سيأتى ذكره
فيما بعد . هذا ويمكن تلافي ذلك بعمل القلب الحديدي بالشكل المبين في شكل
(٣-٧) وإن كان مثل هذا القلب لا يستخدم عادة في الحياة العملية . كما أن
هذا الاختلاف لا يوجد في المحول الهيكلي ثلاثى المراحل ، أو في المحول ذى
القلب خماسى السيقان ثلاثى المراحل (5 core 3-phase transformer) المبين
في شكل (٣-٧ب) . ومن أهم مميزات هذا النوع أن مساحة مقطع الفك تكون
حوالى 60 % من مساحتها في المحول ذى القلب وهذا يؤدي إلى خفض إرتفاع
المحول ، مما يجعل نقله ميسوراً في بعض الحالات ، التى قد يتسبب إرتفاع المحول
الشاهق نسبياً فيها ، في جعل نقله متعذراً . ويبين شكل (٤-٧) الأشكال المختلفة
لمقطع القلب الحديدي ، وطريقة إعداد قنوات التبريد بداخله ، مع ربط الرقائق
معاً ، لخفض الطنين ، الذى يصدر عن المحول ، إلى أقصى درجة ممكنة ، هذا الطنين
الذى يذنبأ بسبب القوى المغناطيسية (magnetic forces) المؤثرة على الرقائق .
كما يبين شكل (٥-٧) كيفية ترتيب الفك (yoke) مع القلب الحديدي . وتظهر
في أ الطريقة المستخدمة مع المحولات الصغيرة ، ومتوسطة الحجم ، حيث تتداخل
رقائق الفك مع رقائق الساق ، بحيث تتطابق هذه الرقائق جزئياً (overlap)



شكل (٥-٧)

عند موضع اتصال الفك بالساق . وفي ب تظهر الطريقة التي تستخدم مع المحولات الكبيرة ، حيث يوضع الفك فوق الساق مع وضع ورق مقوى أو ميكانيكيت بينهما . ويلاحظ أن طول الشفرة الهوائية الفعال يزداد في هذه الحالة عن الحالة السابقة ، مما يؤدي إلى زيادة قيمة تيار المغطسة ، وكذلك تيار الحمل ، في هذه الحالة . هذا ويتكون كل من السيقان (legs or cores) وكذلك الفكوك (yokes) من رقائق من سبيكة الحديد مع السليزيوم (لتقليل المفقودات الحديدية مع استخدام كثافة فيض عالية نسبياً) ، التي يكون سمكها 0.35 مم . ويمزل الرقائق عن بعضها البعض (للحد من مفقودات التيارات الإعصارية) طبقة من الورق ، الذي سمكه 0.02 — 0.03 مم ، والذي يُلصق على أحد وجهي كل رقيقة ، أو من الورنيش أو الزجاج السائل ، الذي يدهن به أحد وجهي الرقيقة . وقد يكون مقطع القلب أو للساق على شكل مربع أو صليب ، في المحولات صغيرة ومتوسطة الحجم ، كما أنه يكون مدرجاً في المحولات الكبيرة شكل (٤ — ٧ ب) ، أما بالنسبة لقنوات التبريد داخل الحديد ، فقد تكون في اتجاه ترتيب الرقائق ، أو في الاتجاه العمودي عليه ، كما هو مبين في نفس الشكل . ويكون ربط الرقائق معاً ، بحيث لا تعطي طينياً ، بسبب الاهتزازات الناشئة عن القوى المغناطيسية ، بوساطة أحزمة ، وهذه هي أبسط طريقة ، ويمكن أن تستخدم في المحولات الصغيرة . ولكن تستخدم عادة المسامير ، التي تربط عليها الصواميل (Bolt and nut) ، أو المسامير المخرّوة (rivets) للحصول على الضغط المطلوب لمنع الطنين ، الذي يتراوح بين 5 — 8 كجم/سم^٢ . ويجب عزل المسامير والصواميل عن حديد المحول (لتلافي حدوث مفقودات تيارات إعصارية زائدة) باستخدام أسطوانات وشرائح من الورق المقوى ، أو الخشب ، كما هو مبين في شكل (٤ — ٧ ج) . ونحتاج ، عندما يكون مقطع الحديد كبيراً ، إلى استخدام ألواح ضاغطة لتوزيع

الضغط على السطح (press plates) ، التي يستحسن أن تكون غير مغناطيسية . فإذا اضطررنا إلى استخدام مواد مغناطيسية مثل حديد الزهر ، أو الصاب المسبوك وجب تقسيمها إلى شرائح ، للحد من تأثير التيارات الإعصارية فيها .

الملفات : (Windings)

يوجد نوعان رئيسيان من الملفات في المحولات ، وهما الملفات الأسطوانية (cylindrical windings) ، والملفات القرصية (disc windings) . ففي الحالة الأولى تكون الملفات الابتدائية والثانوية على شكل أسطوانات ، كما هو مبين في شكل (٦ - ١٧) ، بينما تكون في الحالة الثانية على شكل أقراص ، كما هو مبين في نفس الشكل ب ، حيث تعني L. T. (low tension) الملفات التي تنتمي إلى الضغط المنخفض و H. T. (high tension) الملفات التي تنتمي إلى الضغط العالي ، في الحالتين . ويمكن تركيز كل من الملفات الابتدائية والثانوية ، في حالة الملفات الأسطوانية ، في ملف أسطوانى واحد ، كما هو مبين في الشكل ، كما يمكن تكوين كل منهما من أسطوانتين ، يتناوب وضعها جميعا على القاب الحديدى ، بحيث يأتى دائما أولا ، من ناحية الحديد ، بسبب دواعى العزل عنه ، ملف ضغط منخفض . هذا وتتحكم طريقة تقسيم الملفات وتشكيلها ، في ممانعة التسرب المرحلية للمحول ، كما سوف يتضح في باب التصميم فيما بعد . وتختلف قيمة هذه الممانعة في حالة الملفات الأسطوانية عنها في حالة الملفات القرصية . ويراعى بالنسبة لقيمة هذه الممانعة أيضا ، ودواعى العزل عن الحديد ، أن يوضع نصف قرص من ملفات الضغط المنخفض عند الطرفين ، أى أعلا وأسفل الملفات ، عند استخدام الملفات القرصية ، ويفضل ، في حالة الملفات الأسطوانية عادة ، تقسيم ملف الضغط المنخفض إلى أسطوانتين ، توضع بداخلهما أسطوانة الضغط العالي ، حيث يؤدي

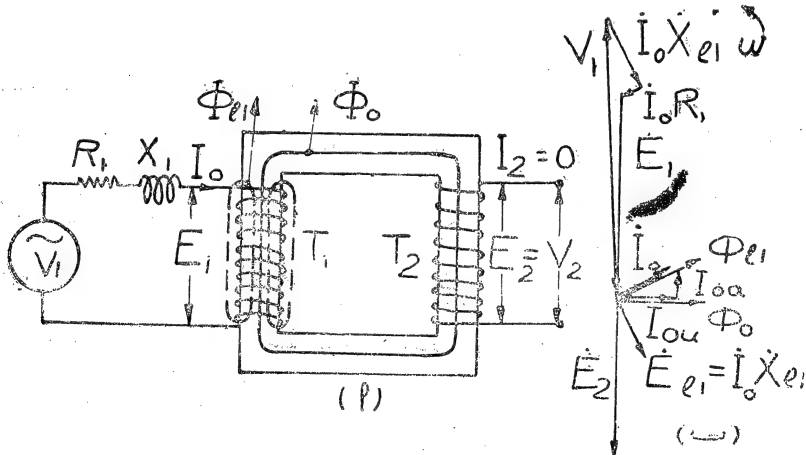
هذا الترتيب إلى خفض قيمة ممانعة التسرب ، وخفض إرتفاع المحول كذلك .

نوضح فيما يلي كيفية ترتيب الملفات الاسطوانية (ملفين كاملين) على الساق الحديدى . يوضع ملف الضغط المنخفض فوق اسطوانة من الورق المقوى لكي تعزله عن الساق (ويمكن فى بعض الحالات الإستغناء عن هذه الاسطوانة والإكتفاء بالعازل فوق اللقات) . يترك بعد ذلك حيز اسطوانى للتبريد (يمتلئ بالزيت) ، ثم اسطوانة (أو أكثر) من البكاليت أو الورق المقوى (أو أى مادة أخرى عازلة) ، يوضع فوقها ملف الضغط العالى ، الذى ينقسم إلى قطاعات ، بحيث لا يزيد ضغط اللقات فى كل قطاع منها عن 1000 فولت .

تخطيط متجهات المحول بدون حمل :

(Vector diagram of transformer on no load)

يبين شكل (٦-١٧) ملفى محول أحادى المرحلة (أو ما يكافئ مرحلة فى محول ثلاثى المراحل) . ويوصل الملف الابتدائى إلى الينبوع ، فى حين يترك



شكل (٦-١٧)

الملف الثانوى مفتوحا (open circuited secondary) ، بحيث لا يمر فيه أى تيار . فإذا كان ملف الضغط العالى هو المتصل بالينبوع ، يكون المحول لخفض الضغط (step down transformer) ، أما إذا كان ملف الضغط المنخفض هو المتصل بالينبوع ، يكون المحول لرفع الضغط (step up transformer) . وفى كلتا الحالتين يمر من الينبوع تيار اللاحمل الابتدائى (primary no load current) I_0 فى الملف الابتدائى ، فى حين يظل الملف الثانوى بدون تيار. هذا وتحدد قيمة I_0 ، ووضعه المرحلى بالنسبة لضغط الينبوع V_1 على النحو التالى :

أولا - ينشأ فى القلب الحديدى ، نتيجة لمرور التيار المتردد I_0 فى الملف الابتدائى ، فيض مغناطيسى متردد ، ينقسم إلى قسمين ، هما ϕ_0 ، ϕ_{11} . يكون ϕ_0 متشابكا ، على قدم المساواة ، مع جميع لفات الملف الابتدائى T_1 ، وكذلك مع جميع لفات الملف الثانوى T_2 ، بينما يكون ϕ_{11} متشابكا مع لفات الملف الابتدائى فقط . لذلك ينتج عن ϕ_0 توليد قوة دافعة كهربية مضادة E_1 فى الملف الابتدائى ، وقوة دافعة كهربية E_2 فى الملف الثانوى ، يكونان فى اتفاق مرحلى ، وتساوى النسبة بينهما $\frac{E_1}{E_2}$ نفس النسبة بين عدد لفات الملفين $\frac{T_1}{T_2}$. أما ϕ_{11} فينتج عنه ، حسب قانون لنز ، توليد قوة دافعة كهربية مضادة E_{11} ، فى الملف الابتدائى ، يمكن اعتبارها مكافئة لهبوط الضغط $X_1 I_0$ ، الناشئ عن مرور التيار I_0 فى ممانعة التسرب للملف الابتدائى X_1 أوم (وهى التى نحصل عليها من حساب معامل الحث الذاتى لهذا الملف بسبب تشابك ϕ_{11} معه) ، التى سوف نعتبرها ثابتة القيمة ، مهما اختلفت قيمة التيار . ($X_1 = X_{11}$)

ويكون اعتبار أن X_1 ثابتة القيمة صحيحا ، مهما اختلفت قيمة التيار ، على أساس أن مسار الخطوط ϕ_{11} يظل غير مشبع بالخطوط المغناطيسية ، مهما

بلغت قيمة التيار . وهذا يحتمل التحقيق ، بالنسبة لاي فيض مغناطيسى مقسرب في المحول ، سواء في الملف الابتدائى ، أو في الملف الثانوى ، لأن الجزء الرئيسى من مسار مثل هذا الفيض يكون عادة في الهواء . لذلك يمكننا اعتبار أن قيمة الفيض المتسرب تتناسب مع قيمة التيار ، فيكون $\Phi_{11} = C_{11} I_1$ ، $\Phi_{12} = C_{12} I_2$ ، ويكون معامل الحث الذاتى L ، الذى تحسب على أساسه قيمة ممانعة التسرب $X_1 = 2 \pi f L$ ، X_2 (هندسة الآلات الكهربائية صفحة ١٠٥ ، ١٠٦) عبارة عن :

$$X_1 = \frac{T_1 \Phi_{11} \times 10^{-8}}{I_1} = C_{11} T_1 \times 10^{-8} ,$$

$$X_2 = \frac{T_2 \Phi_{12} \times 10^{-8}}{I_2} = C_{12} T_2 \times 10^{-8}$$

أما قيمة القوة الدافعة الكهربائية المضادة ، التى تنشأ في الملف نتيجة لوجود الفيض المتسرب متشابكا معه ، فنجد أنها عبارة عن :

$$E_{11} = - T_1 \frac{d \Phi_{12}}{dt} \times 10^{-8} ,$$

$$E_{12} = - T_2 \frac{d \Phi_{12}}{dt} \times 10^{-8}$$

أى أنها تتناسب مع قيمة التيار . وبذلك نستطيع اعتبار أن :

$$E_{11} = I_1 X_1 \quad . \quad E_{12} = I_2 X_2$$

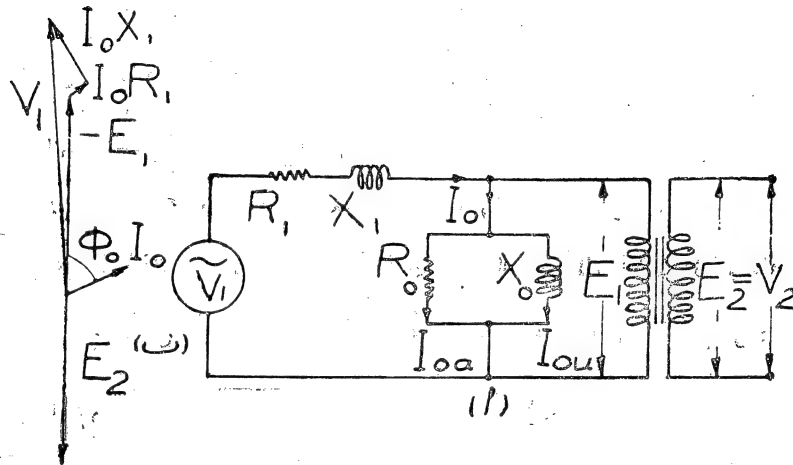
ويكون اتجاه E_1 عموديا على اتجاه التيار المناظر ، بالضبط على أساس أنها عبارة عن هبوط الضغط في الممانعة X_1 الناشئ عن مرور هذا التيار فيها .

كذلك يتسبب عن مرور التيار I_0 في الملف الابتدائى حدوث هبوط ضغط

مقداره $R_1 I_0$ ، حيث R_1 هي مقاومة الملف الابتدائي بالاووم . هذا ويجب أن يتعادل الضغط \dot{V}_1 مع مجموع كل من \dot{E}_1 ، $\dot{I}_0 X_1$ ، $\dot{I}_0 R_1$ ، باعتبارها جميعا متجهات ، أو على حسب قانون كيرشوف الاول يجب أن يكون :

$$\dot{V}_1 + \dot{I}_0 R_1 + \dot{I}_0 X_1 + \dot{E}_1 = 0 \quad (٧-١)$$

يبين شكل (٦-٧ ب) مخطط متجهات المحول بدون حمل ، وتظهر متجهات المعادلة (١) ، بأوضاعها المرحلية التي تحقق هذه المعادلة . ويلاحظ أننا شطنا التيار I_0 إلى مركبتين ، إحداها I_{0u} عبارة عن تيار المغنطة (magnetising current) ، الذى ينشأ ϕ_0 ، ويكون لذلك فى اتفاق مرحلى معه ، ومتقدما بزاوية مرحلية مقدارها 90 درجة عن E_1 (وكذلك E_2) ، والشانية هي I_{0a} عبارة عن تيار المفقودات الحديدية (iron loss current) ، الذى يحمل معه القدرة اللازمة لغطية المفقودات الحديدية فى حديد المحول ، وهى التى سوف نرمن اليها بالرمز P_{VFe} . يبين شكل (٧-٧ أ) الدائرة المكافئة للمحول ، التى تأخذ جميع الحقائق ، السابق ذكرها ، فى الاعتبار ، حيث R_0 هي مقاومة مكافئة لحساب المفقودات الحديدية بالعلاقة $P_{VFe} = I_{0a}^2 R_0$ ، كما أن X_0 هي ممانعة التفرطس (magnetising reactance) المكافئة ، لحساب القوة الدافعة الكهربائية المضادة بالعلاقة $E_1 = I_{0u} X_0$. ويلاحظ أن فصل ϕ_0 عن ϕ_{11} قد أدى إلى اعتبار ممانعتين منفصلتين ، هما X_1 و X_0 ، وقد كان من الممكن اعتبارهما معا ممانعة واحدة ، يمكن حسابها من قيمة معامل الحث الذاتي المكافئ لتأثير ϕ_0 ، ϕ_{11} معا . ولكننا سوف نستفيد من الاوضاع على هذا النحو فى تحليلاتنا المقبلة . ذلك لأن ϕ_0 المتشابهك تشابها تاما مع كل من T_1 ، T_2 ، يعنى أن معامل



شكل (٧-٧)

الازدواج بين الملفين ، المبينين في الدائرة المكافئة في شكل (٧-٧) ، يساوى الوحدة ، وهو ما يجعل حسابات الملف الثانوى أكثر سهولة ، عند تحميل المحول .

تجد في شكل (٧-٧) نفس مخطط المتجهات المبين في شكل (٦-٧) ،

ولكن بالانجذاب المضادة لكل من \dot{E}_1 ، $\dot{I}_0 R_1$ ، $\dot{I}_0 X_1$ ، وهذا يعنى أنها أصبحت تمثل في شكل (٧-٧) مركبات الضغط V_1 ، اللازمة للتغلب على كل

من \dot{E}_1 ، $\dot{I}_0 R_1$ ، $\dot{I}_0 X_1$ ، بعد أن كانت تمثل نفس هذه المتجهات بمسمياتها

الأصلية في شكل (٦-٧) (\dot{E}_1 هى القوة الدافعة الكهربائية المضادة التى يولدها

Φ_0 في الملف الابتدائى ، فهى متخلفة 90° عن \dot{I}_{0m} ، و $\dot{I}_0 R_1$ هبوط الضغط في

مقاومة الملف الابتدائى ، فهو في عكس اتجاه \dot{I}_0 ، و $\dot{I}_0 X_1$ هبوط الضغط في

الممانعة X_1 ، فهو متخلف عن \dot{I}_0 بزاوية 90° . وكل ذلك كما في شكل (٦-٧)

ب)).

بالنسبة لقيمة كل من E_2 , E_1 نفرض أن القيمة اللحظية ϕ للفيض المغناطيسى المتبادل (mutual flux) تتغير على منحنى جيبى يكون $\phi_0 = \phi_m \cos \omega t$ ، حيث ϕ_m هى قيمة النهاية العظمى للفيض المتبادل فى القلب الحديدى بالخطوط . معنى أن القيمة اللحظية للقوة الدافعة الكهربائية e المتولدة فى كل لفة على القلب الحديدى ، سواء كانت هذه اللفة فى الملف الابتدائى أو الملف الثانوى ، تكون هى الأخرى متغيره على منحنى جيبى بالصورة $e = E_{tm} \sin \omega t$ حيث E_{tm} هى قيمة النهاية العظمى للقوة الدافعة الكهربائية المتولدة فى اللفة الواحدة وقيمتها $\omega \phi \times 10^{-8}$ فولت . وبذلك نجد أن القيمة الفعالة للضغط المتولد فى كل لفة E_f بالفولت هى :

$$E = 2\pi f \phi_m \times \frac{10^{-8}}{\sqrt{2}} = 4.44 \phi_m f \times 10^{-8} \dots\dots (٧-٢)$$

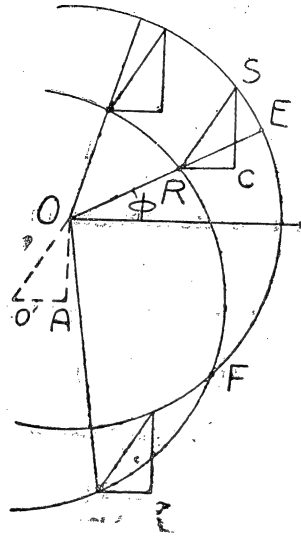
ومن ثم نجد أن قيمة كل من E_2 و E_1 هى :

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4.44 \phi_m T_1 f \times 10^{-8} \\ E_2 &= 4.44 \phi_m T_2 f \times 10^{-8} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (٧-٣)$$

وعندما يكون المحول بدون حمل فإن $V_1 \approx E_1$ ، كما أن $V_2 = E_2$ بحيث يمكننا أن نعتبر أن :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{T_1}{T_2} \approx \frac{V_1}{V_2} \dots (٧-٤) \text{ (المحول بدون حمل)}$$

ونظرا لأن قدرة المدخل تساوى المفقودات الحديدية والنحاسية فى المحول ، لأن قدرة المخرج تساوى صفرا ، ونظرا لصغر قيمة التيار الابتدائى ، وعدم وجود تيار فى الملف الثانوى ، فإننا نستطيع إهمال المفقودات النحاسية ، فى هذه



شكل (٨-٧)

فقط . ويمثل ϕ_2 رد فعل تيار الحمل I_2 على الملف الابتدائي الذي أنشأه ، وهو على حسب قانون لنز يكون في إتجاه مضاد تماما لاتجاه الفيض ϕ_0 ، الذي كان سببا في وجوده . ولكن نظرا لأن ϕ_0 مرتبط بضغط الينبوع الثابت V_1 ، ولا يتأثر إلا بالتأثير في قيمة هذا الضغط ، فإن الينبوع يتجاوب مع رد الفعل الناشئ عن وجود التيار I_2 ، في الملف الثانوى ، بالفعل المضاد له ، وهو عبارة عن التيار I_{12} ، الذى يمر في الملف الابتدائي ، لكي يعطى في الدائرة المغناطيسية للمحول ، وهى القلب الحديدى ، فيضا مساويا ومضادا للفيض ϕ_2 ، وذلك حتى لا يؤثر هذا الأخير أى تأثير على ϕ_0 . ويلاحظ أن I_{12} لا يمكن أن يعطى فيضا متبادلا فقط ϕ_1 ، يكون متشابكا على قدم المساواة مع كل من T_1 و T_2 ، لى يلقى تأثير ϕ_2 ، وإنما لابد أن يعطى إلى جانب ذلك فيضا متشابكا مع T_1 ، بحيث نحصل على زيادة كبيرة في الفيض المتشابك مع T_1 وهو ϕ_{11} ، فقط

الذى كان موجودا عندما كان المحول بدون حمل . وتناسب هذه الزيادة في ϕ_{11} مع الزيادة في تيار الملف الابتدائي من I_0 إلى I_1 ، الناتج من مجموع I_0 ، I_{12} .
يمثل ϕ_{11} فيضا متسربا بالنسبة للملف الابتدائي ، كما يمثل ϕ_{12} فيضا متسربا بالنسبة للملف الثانوى . ويعطى ϕ_{11} قوة دافعة كهربية مضادة ، يمكن الإستعاضة عنها بهبوط الضغط $X_1 I_1$ ، في الملف الابتدائي ، حيث تكون X_1 هى ممانعة التسرب لهذا الملف ، المحسوبة بمعامل الحث الذاتى الناشئ عن فعل ϕ_{11} ، مع وجود التيار I_1 ، في الملفات T_1 . كما يعطى ϕ_{12} قوة دافعة كهربية مضادة ، يمكن الاستعاضة عنها بهبوط الضغط $X_2 I_2$ ، في الملف الثانوى ، حيث X_2 هى ممانعة التسرب لهذا الملف ، المحسوبة بمعامل الحث الذاتى الناشئ عن ϕ_{12} ، مع وجود التيار I_2 في الملفات T_2 . هذا ويمكن اعتبار أن X_1 و X_2 ثابتان في القيمة .

ونظرا لأن كل من ϕ_1 و ϕ_2 يمر في نفس الدائرة المغناطيسية ، وهى القلب الحديدي ، ويقابل نفس المعاوقة المغناطيسية ، بناء على ذلك ، فإن تساوى ϕ_1 مع ϕ_2 يستلزم أن تكون القوة الدافعة المغناطيسية ، التى أنشأت أحدهما ، تساوى القوة الدافعة المغناطيسية ، التى أنشأت الآخر . وهذا يعنى ضرورة تساوى $I_{12}T_1$ مع $I_2 T_2$ ، فيكون

$$\frac{I_{12}}{I_2} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{E_2}{E_1} \dots\dots\dots (٧-٥)$$

هذا ونظرا لأن I_0 يكون صغيرا جدا بالنسبة لكل من I_1 ، I_{21} ، فإنه يمكن دائما اعتبار أن قيمة التيار I_{12} تساوى قيمة التيار I_1 تقريبا ، بحيث يمكننا أن نعتبر أن :

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{T_2}{T_1} , \quad I_{12} \approx I_1 \dots \dots (١٧-٥)$$

يبين شكل (٨-٧) مخطط المتجهات ، مع وجود الحمل على المحول . ويمكن
تتبع المتجهات في هذا الشكل ، على هدى ما سبق شرحه ، على النحو التالي : \dot{V}_2
هو متجه الضغط على طرفي الملف الثانوى عند وجود الحمل ، الذى يجمع على
 $\dot{I}_2 R_2$ ، مركبة القوة الدافعة الكهربائية للتغلب على هبوط الضغط في مقاومة الملف
الثانوى R_2 ، وعلى $\dot{I}_2 \dot{X}_2$ ، مركبة القوة الدافعة الكهربائية للتغلب على هبوط
الضغط في ممانعة التسرب للملف الثانوى X_2 ، فنحصل على القوة الدافعة الكهربائية
 \dot{E}_2 . هذا في الوقت الذى يكون فيه تيار الحمل في الملف الثانوى ممثلاً بالمتجه \dot{I}_2
الذى يصنع الزاوية ϕ مع \dot{V}_2 ، وهى زاوية الاختلاف المرحلى بينهما ، التى تتحدد
بناء على طبيعة معاوقة الحمل Z_L . متجه التيار \dot{I}_{12} يكون في عكس اتجاه \dot{I}_2 تماماً ،
وتتحدد قيمته بالنسبة لقيمة \dot{I}_2 من المعادلة (٥-٧) . يجمع \dot{I}_{12} مع \dot{I}_0 نحصل
على متجه التيار في الملف الابتدائى \dot{I}_1 ، الذى يتحدد بناء على وجوده كل من
 $\dot{I}_1 R_1$ (مركبة الضغط \dot{V}_1 ، اللازمة لمعادلة هبوط الضغط ، الناشئ عن مرور
التيار \dot{I}_1 ، في مقاومة الملف الابتدائى R_1) و $\dot{I}_1 \dot{X}_1$ (مركبة الضغط \dot{V}_1 ،
اللازمة لمعادلة هبوط الضغط الناشئ عن مرور التيار \dot{I}_1 في ممانعة التسرب للملف
الابتدائى \dot{X}_1) ، وكذلك \dot{V}_1 .

الدائرة المكافئة للمحول :

(The equivalent circuit of the transformer)

بمراجعة الاشكال السابقة نجد أننا ، لكي نقوم برسم مخطط المتجهات للمحول أو عمل أية تحليلات أخرى ، نحتاج إلى رسم الدائرة الكهربائية ، التي تمثل الملفات . وهي تتكون من جزئين ، جزء يمثل الملف الابتدائي ، وجزء يمثل الملف الثانوي ، وهما غير متصلين ، ويجب أن نفتقل من أحدهما إلى الآخر ، عن طريق المجال المغناطيسي في القلب الحديدي ، الذي يربط بينهما . ولكي يكون تناول الأمور أكثر بساطة وسهولة ، نحتاج في الحقيقة إلى دائرة واحدة متصلة ، يغذى لينبوع أحد طرفيها ، ويوضع الحمل على طرفها الآخر . يطلق على مثل هذه الدائرة اسم الدائرة المكافئة للمحول ، ويجب أن يراعى في اعدادها أن تعطى نفس النتائج لخواص التشغيل الأساسية للمحول ، وأهمها ، بالنسبة لحكمنا على صلاحية المحول لأداء مهمة معينة ، معامل التنظيم ومعامل الجودة . لذلك نسير ، في سبيل الحصول على هذه الدائرة المكافئة على النحو التالي :

إن أول ما نهدف إليه في الدائرة المكافئة أن تكون متصلة . وهذا لا يتأتى إلا بجعل القوة الدافعة الكهربائية في الملف الثانوي مساوية للقوة الدافعة الكهربائية للملف الابتدائي ، بحيث يمكن ، بناء على ذلك ، إلغاء هذين الملفين ، ووصل الدائرة عند موضعهما ، إستناداً إلى تساوي الضغط عند نقطتي الاتصال ، الأمر الذي لا يؤثر أي تأثير على الخواص الكهربائية للدائرة ، كما هو معروف . لذلك نفترض أن عدد لفات الملف الثانوي قد أصبحت T'_2 بدلا من T_2 ، بحيث تساوي T'_2 عدد لفات الملف الابتدائي T_1 ، لكي تعطينا القوة الدافعة الكهربائية الثانوية E'_2 التي تساوي E_1 . ويقال في هذه الحالة إننا ننسب (refer) الملف الثانوي إلى الملف الابتدائي . ويمكن أن يحدث العكس بطبيعة الحال ، حيث نفترض أن عدد لفات الملف الابتدائي قد أصبحت T'_1 ، التي تساوي T_2 ، فنحصل على القوة

الدافعة الكهربائية E'_1 في الملف الابتدائي تساوى E_2 ، وبذلك نحصل على الملف الابتدائي منسوباً إلى الملف الثانوي (primary winding referred to secondary side) . ويجب ، في كلتا الحالتين ، ألا تتغير قيمة كل من معامل التنظيم ومعامل الجودة للمحول ، وهذا يستلزم أن يتوفر الشرطان الآتيان :

أولاً — لكي لا تتغير قيمة معامل الجودة يجب أن تتساوى قيمة المفقودات النحاسية في الملف الأصلي والملف المنسوب . فإذا أشرنا إلى الكميات المنسوبة ، بالكميات الأصلية وعليها شرطة ، نجد أنه :

١ — عندما يكون الملف الثانوي منسوباً إلى الملف الابتدائي :

$$I'^2_2 R'_2 = I^2_2 R_2 ,$$

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 = R_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2$$

٢ — عندما يكون الملف الابتدائي منسوباً إلى الملف الثانوي :

$$I'^2_1 R'_1 = I^2_1 R_1 ,$$

$$R'_1 = R_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2 = R_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2$$

ثانياً — لكي لا تتغير قيمة معامل التنظيم يجب تساوى قيمة هبوط الضغط النسبي ، في كل من المقاومة وممانعة التسرب ، بالنسبة لكل من الملفين الأصلي والمنسوب . وإن ما جاء في أولاً يفي أيضاً بشرط تساوى هبوط الضغط النسبي في المقاومتين ، الأصلية والمنسوبة . أما بالنسبة لتساوى هبوط الضغط في الممانعتين ، الأصلية والمنسوبة ، نجد أن :

١ — عندما يكون الملف الثانوي منسوباً إلى الملف الابتدائي :

$$\frac{I_2 X_2}{V_2} = \frac{I'_2 X'_2}{V'_2} ,$$

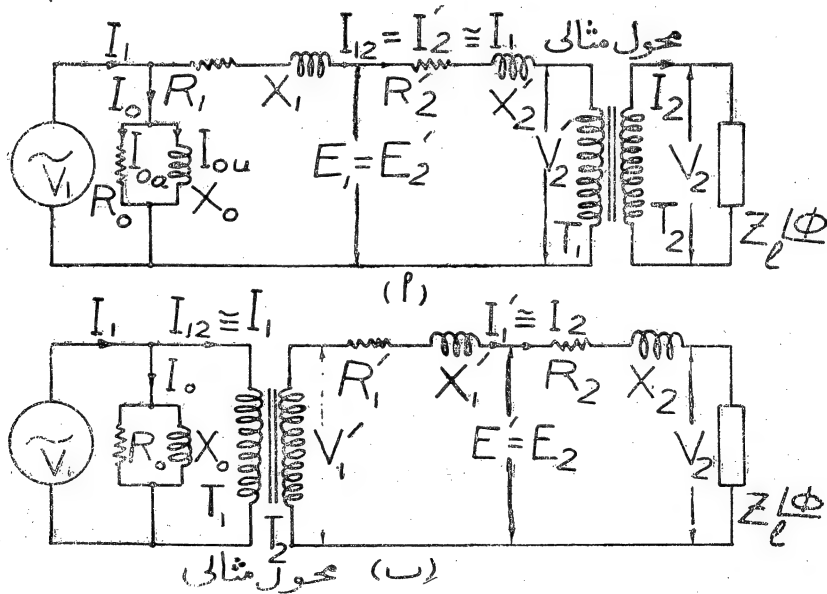
$$X'_2 = X_2 \left(\frac{V'_2}{V_2} \right) \left(\frac{I_2}{I'_2} \right) = X_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2$$

٢ - عندما يكون الملف الابتدائي منسوباً إلى الملف الثانوي :

$$\frac{I_1 X_1}{V_1} = \frac{I'_1 X'_1}{V'_1} ,$$

$$X'_1 = X_1 \left(\frac{V'_1}{V_1} \right) \left(\frac{I_1}{I'_1} \right) = X_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2$$

هذا ولكي يتم تبسيط الدائرة المكافئة ، التي حصلنا عليها بالطريقة السابقة ، حتى يتيسر استخدامها في انجاز الحسابات الخاصة بالمحول دون تعقيد ، مع



الحصول على نتائج ذات تقريب مقبول ، فإننا ننقل معاوقة التخطس (magnetising impedance) من وضعها الأصلي ، على طرفي الملف الابتدائي ، كما هو مبين في شكل (٧-٧) ، (٧-٨) ، إلى الموضع التقريبي على طرفي الينبوع ، كما هو مبين في شكل (٧-٩) ، في الدائرة المكافئة ، التي سوف نستخدمها في تحليلاتنا المقبلة . ونجد أن التقريب في هذه الدائرة ينحصر في أمرين ، يمكن التجاوز عنهما ، وهما :

أولاً — أن الضغط على معاوقة التخطس قد أصبح V_1 بدلا من E_1 ، ونظراً لأن V_1 تكون قريبة جداً من E_1 ، في القيمة والاختلاف المرحلي ، فإن الخطأ الناشئ عن هذا التقريب على كل من I_{oa} و I_{ou} لا يكون له أثر يذكر على النتائج النهائية المطلوبة .

ثانياً — أن التيار المار في كل من R_1 و X_1 قد أصبح I_{12} بدلا من I_1 . ونظراً لأننا نستطيع إعتبار I_{12} مساوياً I_1 ، لأن I_0 يكون عادة نسبة صغيرة جداً من I_1 (بجانب الأتزيد عن 10 %) ، فإننا نستطيع الاستفادة من هذا التقريب ، دون الخوف من أن يكون له تأثير ملحوظ على النتائج المطلوبة .

يبين شكل (٧-٩) الدائرة المكافئة للمحول ، التي يمكننا أن نستخدمها في جميع الحسابات الخاصة بالمحول بعد ذلك . نجد في أ من هذا الشكل الدائرة المكافئة منسوبة إلى الملف الابتدائي (Equivalent circuit referred to primary side) وتكون ثوابتها هي :

$$R_1 , X_1 , Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$$

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 ,$$

$$X'_2 = X_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 ,$$

$$Z'_2 = Z_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 = \sqrt{R'^2_2 + X'^2_2}$$

$$R_{1eq} = R_1 + R'_2 , \quad X_{1eq} = X_1 + X'_2 ,$$

$$Z_{1eq} = \sqrt{R_{1eq}^2 + X_{1eq}^2}$$

$$V'_2 = V_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right) ,$$

$$I'_2 = I_1 = I_2 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \dots \dots (٧-٦)$$

ونجد في ب من شكل (٧-٩) الدائرة المكافئة المحول منسوبة إلى الملف
الثانوى (Equivalent circuit referred to secondary side) ، وتكون
ثوابتها هي :

$$R_2 , \quad X_2 , \quad Z_2 = \sqrt{R^2_2 + X^2_2}$$

$$R'_1 = R_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 ,$$

$$X'_1 = X_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 ,$$

$$Z'_1 = Z_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 = \sqrt{R'^2_1 + X'^2_1}$$

$$R_{2eq} = R_2 + R'_1 , \quad X_{2eq} = X_2 + X'_1 ,$$

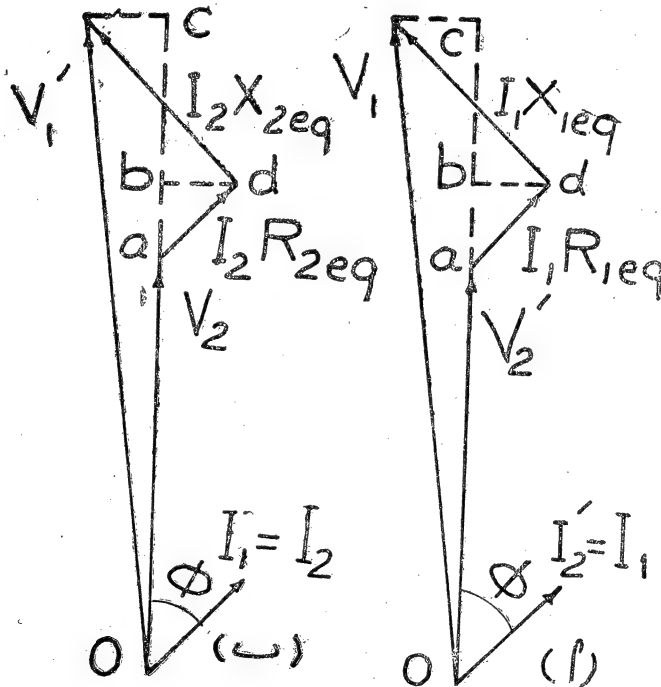
$$Z_{2eq} = \sqrt{R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2}$$

$$V'_1 = V_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) ,$$

$$I'_1 = I_2 = I_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \dots\dots (v-v)$$

(Regulation of the transformer) : **معامل التنظيم للمحول**

يبين شكل (١٠-٧) مخطط المتجهات للمحول على أساس الدائرة المكافئة المبينة في شكل (٩-٧)، كما أن مخطط المتجهات في شكل (١٠-٧) مرسوم على أساس الدائرة المكافئة في شكل (٩-٧).



شكل (١٠-٧)

يتضح من شكل (٧-٩) أن ضغط الينبوع V_1 يدخل المحول المثالي بالقيمة V'_2 ، بعد احتساب جميع هبوطات الضغط للمحول باستخدام الدائرة المكافئة ، ويخرج من المحول المثالي إلى طرفي الحمل مباشرة بالقيمة V_2 ، فيكون معامل التنظيم ، على أساس نفس التعريف الذي أوردناه في الباب الرابع ، بالنسبة للدولادات ، هو :

$$\varepsilon = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} , \quad \varepsilon \% = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} \times 100 \quad (٧-٨)$$

ويتضح من شكل (٧-٩ب) أن ضغط الينبوع V_1 يدخل المحول المثالي مباشرة ، ويخرج منه بالقيمة V'_1 ، وبعد احتساب جميع هبوطات الضغط للمحول باستخدام الدائرة المكافئة ، يصبح الضغط على طرفي الحمل V_2 ، فيكون معامل التنظيم ، على هذا الأساس ، هو :

$$\varepsilon = \frac{V'_1 - V_2}{V'_1} , \quad \varepsilon \% = \frac{V'_1 - V_2}{V'_1} \times 100 \quad (٧-٩)$$

بالرجوع إلى شكل (١٠-٩) ، نجد أن :

$$V_1 \cong OC \cong Oa + ab + bC \cong V'_2 + I_1 R_{1eq} \cos \phi + I_1 X_{1eq} \sin \phi$$

$$\therefore V_1 - V'_2 \cong I_1 R_{1eq} \cos \phi + I_1 X_{1eq} \sin \phi$$

$$\therefore \varepsilon \cong \frac{I_1 R_{1eq} \cos \phi + I_1 X_{1eq} \sin \phi}{V_1} \quad \dots \quad (٧-١٠)$$

بالرجوع إلى شكل (١٠-٩ب) ، نجد أن :

$$V'_1 \cong OC \cong Oa + ab + bC \cong V_2 + I_2 R_{2eq} \cos \phi + I_2 X_{2eq} \sin \phi$$

$$\therefore V'_1 - V_2 \cong I_2 R_{2eq} \cos \phi + I_2 X_{2eq} \sin \phi$$

$$\therefore \varepsilon \approx \frac{I_2 R_{2eq} \cos \phi + I_2 X_{2eq} \sin \phi}{V_1'} \dots (٧-١١)$$

تستخدم أى من المعادلتين (٧-١٠) أو (٧-١١) لحساب معامل التنظيم للمحول، باستخدام ثوابته، وتيار الحمل ومعامل قدرته، منسوبة إلى الملف الابتدائي، أو الملف الثانوي. هذا ويمكن الحصول على هذه الثوابت بإجراء اختباري اللاحل، ودائرة القصر على المحول. ويمكن في هذه الحالة أيضا الحصول على المعلومات اللازمة لحساب معامل جودة المحول، كما سوف يتضح حالا. ومن الواضح أن كلا من المعادلتين (٧-١٠)، (٧-١١) تقريبتان، ولكن نظرا لأن تصميم المحول يتم عادة على أساس أن هبوط الضغط عند الحمل الكامل، وبالتالي معامل التنظيم، يكون صغيرا جدا (لا يكاد يصل إلى ١٠ %)، فإننا نحصل من هاتين المعادلتين على نتائج مرضية للغاية، تفى باحتياجاتنا للعملية، وذلك نظرا لأن الزاوية بين V_1 و V_2' (أو بين V_1 و V_2) تكون صغيرة جدا. وعلى العموم يمكننا الحصول على القيم الأصلية بدون تقريب على النحو التالي: أولا — إذا كان V_2 معلوما (أو V_2')، والمطلوب الحصول على V_1' (أو V_1) نجد، بالرجوع إلى شكل (٧-١٠، أ، ب) أن:

$$V_1' = \sqrt{(V_2 \cos \phi + I_2 R_{2eq})^2 + (V_2 \sin \phi + I_2 X_{2eq})^2}$$

$$V_1 = \sqrt{(V_2' \cos \phi + I_1 R_{1eq})^2 + (V_2' \sin \phi + I_1 X_{1eq})^2} \quad (٧-١١)$$

ويمكن بتطبيق المعادلتين (٧-٨)، (٧-٩) بعد ذلك الحصول على معامل التنظيم. ثانيا — أما إذا كان المطلوب وضع حمل معين، بمعامل قدرة معين، على المحول، عندما يكون موصلا إلى ينبوع ذي ضغط ثابت معين V_1 (أو V_1')، ثم تعيين معامل التنظيم، أو بمعنى أصح تعيين الضغط على طرفي الحمل،

V'_2 (أو V_2) . فافترضنا استخدام المعادلتين (٧-٤) ، (٨-٤) ، اللتين سبق استنباطهما للحالة المماثلة في المولد المتزامن ، في الباب الرابع ، حيث نجد أن V_1 (أو V'_1) هنا تناظر E_0 هناك ، وأن V'_2 (أو V_2) هنا تناظر V هناك ، بينما تأخذ R_{1eq} (أو R_{2eq}) هنا مكان R_2 هناك ، وتأخذ X_{1eq} (أو X_{2eq}) هنا مكان X_2 هناك ، ويظل نفس المعنى لمركبتى الجهد P و Q ساريا ، وكذلك معامل قدرة الجهد $\cos \phi$. وعلى هذا الأساس نجد أن :

$$a (V_2^2)^2 + b V_2^2 + C = 0$$

$$a' (V'^2_2)^2 + b' V'^2_2 + C' = 0 \quad \dots \dots (٧-١١)$$

$$a = 1 \quad , \quad a' = 1$$

$$b = - [V'^2_1 - 2 (PR_{2eq} + QX_{2eq})]$$

$$b' = - [V_1^2 - 2 (PR_{1eq} + QX_{1eq})]$$

$$C = (R^2_{2eq} + X^2_{2eq}) \left(\frac{P}{\cos \phi} \right)^2 = Z^2_{2eq} \left(\frac{P}{\cos \phi} \right)^2$$

$$C' = (R^2_{1eq} + X^2_{1eq}) \left(\frac{P}{\cos \phi} \right)^2 = Z^2_{1eq} \left(\frac{P}{\cos \phi} \right)^2$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4C}}{2}} = \sqrt{\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4C}}{2}}$$

$$V'_2 = \sqrt{\frac{-b' \pm \sqrt{b'^2 - 4C'}}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{-b' + \sqrt{b'^2 - 4C'}}{2}} \quad \dots \dots \dots (٧-١١)$$

مخطط كاب لحساب معامل التنظيم : (Kapp's regulation diagram)

يستخدم هذا المخطط للحصول على القيم المختلفة لمعامل التنظيم ، عندما يظل تيار الحمل ذا قيمة ثابتة بدون تغيير ، ويتغير مع ذلك معامل القدرة . يبين شكل (٨-٧) ص ٣٤٤ مخطط كاب وطريقة رسمه ، على أساس أن ضغط الينبوع V_1 (أو V'_1) ثابتا ، ويكون التغيير في V'_2 (أو V_2) ناشئا عن تغيير قيمة معامل القدرة ، مع ثبوت قيمة تيار الحمل . O هو مركز الدائرة التي نصف قطرها OE أو OS وهو يمثل الضغط الثابت V_1 (أو V'_1) . المثلث RCS فيه RC يمثل $I_1 R_{1eq}$ (أو $I_1 Z_{1eq}$) أو $I_2 R_{2eq}$ ، SC يمثل $I_1 X_{1eq}$ (أو $I_2 X_{2eq}$) و RS يمثل $I_1 Z_{1eq}$ (أو $I_2 Z_{2eq}$) . عندما يتحرك هذا المثلث موازيا لنفسه ، بسبب تغيير زاوية الاختلاف المرحلي ϕ ، بين التيار الذي يأخذ الوضع الأفقي الثابت OD ، والضغط على طرفي الملف الثانوي V'_2 (أو V_2) ، الذي يأخذ الأوضاع المتغيرة OR ، نتيجة لتغير ϕ ، نحصل على دائرة أخرى يرسمها الطرف R للمتجه V'_2 (أو V_2) ، بحيث يكون مركزها عند O' ، ويكون المثلث $O'OA$ مساويا وموازيا للمثلث RCS . لذلك يكون حساب قيمة معامل التنظيم عند أية نقطة مثل R ، يتحدد بالزاوية ϕ ، عبارة عن $\varepsilon = \frac{RE}{OE}$. وعلى هذا الأساس نستطيع الحصول على المعلومات اللازمة لحساب معامل التنظيم ، عند أى معامل قدرة ، برسم خط يصنع مع OD الزاوية التي يحددها هذا المعامل . ويتضح من مخطط كاب المرسوم في شكل (٨-٧) أن تأثير معامل القدرة على معامل التنظيم يكون على النحو التالي : تزداد قيمة معامل التنظيم بازداد زاوية الاختلاف المرحلي المتأخر حتى يصبح OE على امتداد OO' ، فنحصل في هذا الوضع على قيمة النهاية العظمى لمعامل التنظيم . وفي هذه الحالة نجد أن :

$$\phi = \tan^{-1} \frac{X_{1eq}}{R_{1eq}} = \tan^{-1} \frac{X_{2eq}}{R_{2eq}}$$

وعندما تصبح زاوية الاختلاف المرحلي متقدمة (OE يقع أسفل OD) تقل قيمة معامل التنظيم حتى تصل إلى الصفر عند النقطة F ، أى عندما تصبح ϕ مساوية للزاوية DOF . ومن ناحية أخرى يمكننا أن نستخدم المعادلة (١٠-٧) لمابعة التعبيرات التى تحدث فى معامل التنظيم نتيجة لتغير الزاوية ϕ :

$$\begin{aligned} V_1 - V'_2 &\cong I_1 Z_{1eq} \left(\frac{I_1 R_{1eq}}{I_1 Z_{1eq}} \cos \phi + \frac{I_1 X_{1eq}}{I_1 Z_{1eq}} \sin \phi \right) \\ &\cong I_1 Z_{1eq} (\sin \theta' \cos \phi + \cos \theta' \sin \phi) \\ &= I_1 Z_{1eq} \sin (\phi + \theta') \left[\theta' = \tan^{-1} \frac{R_{1eq}}{X_{1eq}} \right] \end{aligned}$$

وبذلك نحصل على قيمة النهاية العظمى لمعامل التنظيم عندما يكون $\sin (\theta' + \phi)$ يساوى الواحد الصحيح ، أى عندما يكون $\theta' = 90 - \phi$ ، حيث يصبح :

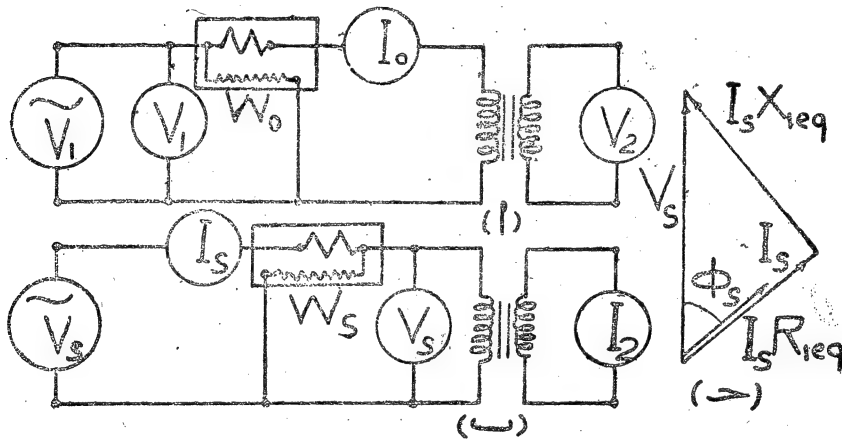
$$\cos \phi = \sin \theta' = \frac{R_{1eq}}{Z_{1eq}} \left(= \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}} \right)$$

$$V_1 - V'_2 = I_1 Z_{1eq} [V'_1 - V_2 = I_2 Z_{2eq}]$$

اختبار الاحمال : (No load Test)

عند اجراء اختبار اللاحمل على المحول يوصل الملفان الابتدائى والثانوى مع أجهزة القياس الكهربائية ، كما هو مبين فى شكل (١١-٧) ، وذلك مع توصيل طرفى الملف الابتدائى مع الينبوع ذى مقنن الضغط (rated voltage) ، وترك طرفى الملف الثانوى مفتوحين ، أو توصيل فولتمتر بينهما . ويكون توصيل

الفولتير في هذه الحالة ، كما سبق ذكره مع المولدات ، مكافئاً لترك الطرفين مفتوحين ، نظراً لارتفاع قيمة المقاومة (أو المعاوقة) الداخلية للفولتير ، لدرجة أنه يمكن اعتبار قيمتها مالا نهاية ، أى أن تيار القياس ، الذى يأخذه الفولتير من الملف الثانوى ، يعتبر مساوياً للصفر . أما بالنسبة لناحية الملف الابتدائى ، فإنه نظراً لأن تيار اللاحمل ، الذى يقيسه الأمبير متر ، يكون صغيراً ، يستحسن ، للحصول على أكبر درجة من الدقة فى القياس ، عدم مرور أى من تيارى القياس ، للفولتير أو ملف الضغط فى الواتر ، فى هذا الأمبير متر . لذلك يراعى عدم تغيير الأوضاع النسبية لهذه الأجهزة عما هو مبين فى الشكل .



شكل (١١-٧)

عندما يكون الضغط المقنن موصل على المحول ، بدون حمل ، يمر تيار اللاحمل الصغير I_0 فى الملف الابتدائى ، وتكون قيمة قدرة المخرج من المحول تساوى صفراً . أما قدرة المدخل W_0 ، التى يأخذها المحول من الشبوك ، فإنها تبدد فى المفقودات . وتكون المفقودات الحديدية فى هذه الحالة موجودة فى المحول بأكملها ، لوجود مقنن الضغط والتردد . أما مفقودات النحاس ، فهى تلك التى

تنتج عن مرور التيار I_o في مقاومة الملف الابتدائي ، وتكون ضئيلة لدرجة يمكن معها إهمالها ، كما سبق ذكره ، عند الكلام عن المحول وهو بدون حمل . وعلى هذا الأساس يمكننا أن نحصل على المعلومات الآتية ، الخاصة بالمحول ، من تجربة اللاحل .

معامل القدرة عند اللاحل :

$$\cos \phi_o = \frac{W_o}{V_1 I_o}$$

مركبتا تيار اللاحل :

$$I_{ou} = I_o \sin \phi_o , \quad I_{oa} = I_o \cos \phi_o$$

مركبتا معاوقة التخطس :

$$X_o \cong \frac{V_1}{I_{ou}} , \quad R_o \cong \frac{V_1}{I_{oa}}$$

مفقودات الحديد في المحول :

$$P_{VFe} = W_o - I_o^2 R_1 \cong W_o$$

نسبة التحويل في المحول :

$$\frac{T_1}{T_2} \cong \frac{V_1}{V_2}$$

اختبار دائرة القصر : (short circuit test)

يكون التوصيل كما هو مبين في شكل (١١ - ب) ، حيث يقصر طرفا الملف الثانوي عن طريق توصيلهما إلى أمبير متر ، الذي تعتبر مقاومته (أو معاوقته) صغيرة ، لدرجة يمكن معها إهمالها ، على هذا الأساس ، ويراعى توصيل ضغط

صغير جدا بالتردد المقنن (في حدود حوالى 5 % من مقنن الضغط في المحولات الصغيرة ومتوسطة الحجم عادة) إلى الملف الابتدائي ، بحيث يمر تيار قصر تكون قيمته مساوية تقريبا لتيار الحمل الكامل ، كما سبق أن فعلنا في حالة المولدات . هذا ويراعى ، في هذه الحالة أيضا ، أن يكون توصيل أجهزة القياس بنفس الأوضاع النسبية ، كما في شكل (١١ - ٧ ب) ، لكي لا يؤثر هبوط الضغط في الأمبير متر ، أو في ملف التيار للواتمتر ، على قراءة الفولتتر الصغيرة ، أو على الضغط الموجود على ملف الضغط في الواتمتر . ونظرا لأن قدرة المخرج تساوى صفراً ، فإن قدرة المدخل تبدد كلها في المفقودات . وتكون المفقودات الحديدية ذات قيمة مهمة ، في هذه الحالة ، نظرا لانخفاض قيمة الضغط بدرجة كبيرة ، مما يسمح لنا أن نعتبر أن قدرة المدخل تساوى المفقودات النحاسية في المححول ، المناظرة لتيار القصر المار فيه ، عند عمل اختبار دائرة القصر . فإذا استطعنا أن نجعل تيار القصر مساويا لتيار الحمل الكامل (full load short circuit current) ، عند إجراء هذا الاختبار ، تكون قدرة المدخل مساوية للمفقودات النحاسية ، عند الحمل الكامل ، تقريبا .

يبين شكل (١١ - ٧ ب) مخطط المنتجات للمحول ، على أساس الدائرة المكافئة منسوبة إلى الملف الابتدائي ، الموصل إلى الينبوع وقت إجراء التجربة ، حيث نجد أن V'_2 يساوى صفراً ، لوجود قصر على طرفي الملف الثانوى . وفي هذه الحالة يمتص الضغط V_1 في هبوط الضغط في معاوقة المحول المكافئة ، منسوبة إلى الملف الابتدائي ، Z_{1eq} ، نتيجة لمرور تيار القصر I_1 فيها . بذلك يمكن الحصول على المعلومات الآتية ، الخاصة بالمحول ، من قراءات الأجهزة في اختبار دائرة القصر :

معامل القدره في حالة القصر :

$$\cos \phi_s = \frac{W_s}{V_s I_s}$$

$$Z_{1eq} = \frac{V_s}{I_s} ,$$

$$R_{1eq} = Z_{1eq} \cos \phi_s , \quad X_{1eq} = Z_{1eq} \sin \phi_s$$

أو :

$$R_{1eq} = \frac{W_s}{I_s^2} ,$$

$$X_{1eq} = \sqrt{Z_{1eq}^2 - R_{1eq}^2}$$

المفقودات النحاسية في المحول عند التيار I_s تساوي W_s .

المفقودات النحاسية عند تيار الحمل الكامل I_H تساوي $W_s \left(\frac{I_H}{I_s} \right)^2$

$$\frac{T_1}{T_2} \cong \frac{I_2}{I_s} \quad \text{نسبة التحويل للمحول :}$$

ملحوظة عامة :

تعتبر تسمية الملفين بالابتدائي والثانوي ، في الواقع ، تسمية نسبية ، تتوقف على كيفية استخدام المحول . فالملف الابتدائي هو الملف الموصل إلى الينبوع الموجود ، والملف الثانوي هو الملف الآخر الذي يعطى الضغط المحول . ومن الواضح أنه يمكن استخدام المحول لرفع الضغط أو خفضه ، على حسب ضغط الينبوع المتوفر . لذلك فقد تكون تسمية الملفين بملف الضغط العالي ، وملف الضغط المنخفض ، أكثر تحديداً لهما ، مع ضمان عدم حدوث أي التباس . هذا

ويراعى ، عند اجراء تجر بتي اللاحمل ودائرة القصر ، أخذ القراءات على الناحية التي يكون أحد الضغوط العادية المتاحة ، أو أقرب ضغط له ، مناسباً للتوصيل عليها مباشرة ، دون الحاجة إلى استخدام أجهزة مساعدة .

حساب معامل التنظيم :

نحصل من اختبار دائرة القصر على كل من المقاومة المكافئة والممانعة المكافئة للمحول منسوبة إلى أحد الملفين ، على حسب الناحية التي أخذت منها القراءات . وبمعرفة تيار الحمل الكامل ومعامل قدرته ، يمكننا حساب قيمة معامل التنظيم باستخدام أى من المعادلتين (١٠-٧) أو (١١-٧) .

معامل جودة المحول : (Efficiency of the transformer)

يكون حساب معامل جودة المحول عادة بمعلومية قدرة الخرج ، التي يحتاج اليها الحمل ، ومعامل قدرته ، والمفقودات التي يبدها المحول ، التي تتحدد بناء على قيمتها ، في هذه الحالة ، قدرة المدخل من الينبوع . ويمكن تحديد قيمة مفقودات الحديد من تجربة اللاحمل ، والمفقودات النحاسية من تجربة دائرة القصر . كما يمكن تحديد المفقودات الحديدية ، بحساب مفقودات التيارات الاعصارية ، ومفقودات التخلف المغناطيسى في الحديد ، إذا أمكن الحصول على المعلومات اللازمة لذلك ، باستخدام المعادلات المعروفة في هذا المضمار (هندسة الآلات الكهربائية من ص ٨٧ إلى ص ٩٧) . كذلك يمكن حساب المفقودات النحاسية بمعرفة مقاومة كل من الملفين الابتدائى والثانوى (أو المقاومة الكلية المكافئة منسوبة إلى أحدهما) ، والتيار في كل منهما (أو للتيار منسوباً إلى الناحية التي نسبت اليها المقاومة الكلية المكافئة) ، مع مراعاة أخذ تأثير الظاهرة القشرية ، على قيمة المقاومة ، مع التيار المتردد ، كما سبق أن فعلنا في حالة المولدات .

إذا فرضنا أن P_{Fe} هي قيمة المفقودات الحديدية ، و P_{cu} قيمة المفقودات النحاسية و P_2 مقن قدرة المخرج (rated output) ، P_1 مقن قدرة المدخل (rated input) ، كلها بالوات ، وذلك عند مقن الضغط (rated voltage) ، ومقن التيار (rated current) (وهو تيار الحمل الكامل (full load current)) نجد أن معامل الجودة η يتحدد على أساس المعادلة :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{cu}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{Fe} - P_{cu}}{P_1}$$

$$= 1 - \left(\frac{P_{Fe}}{P_1} + \frac{P_{cu}}{P_1} \right) = 1 - \delta \dots (٧-١٢)$$

حيث δ هو معامل العجز (deficiency factor) ، وهو يقابل المعامل θ ، الذى سبق الإشارة اليه فى آلات التيسار المستمر (هندسة الآلات الكهربائية ص ٤٣٦) . ونحصل على قيمة النهاية العظمى η_m لمعامل الجودة ، عندما تكون δ فى نهايتها الصغرى ، حيث يشترط أن تكون $\frac{d\delta}{dI}$ يساوى صفرا . فإذا فرضنا أن

$$C_{cu} I = \frac{P_{cu}}{P_1} \text{ باعتبار أن الضغط ثابت ، وفرضنا كذلك } \frac{C_{Fe}}{I} = \frac{P_{Fe}}{P_1}$$

نجد أنه عندما تتغير قيمة التيار I تتغير قيمة η ، ويكون :

$$\frac{d\delta}{dI} = - \frac{C_{Fe}}{I^2} + C_{cu} = 0$$

وهذا هو شرط الحصول على η_m

وفى هذه الحالة يكون $C_{Fe} = C_{cu} I_m^2$ ، مما يعنى أننا نحصل على قيمة النهاية العظمى لمعامل الجودة η_m ، عندما تصبح قيمة التيار I_m ، بحيث تكون مفقودات النحاس ، التى تنتج عن هذا التيار ، مساوية لمفقودات الحديد الثابتة فى المحول

(باعتبار أن التردد والضغط ثابتان) فإذا اعتبرنا أن x هي النسبة بين التيار I_m ، الذى يتحقق معه شرط الحصول على η_m ، و تيار الحمل الكامل I_{fl} ، أى أن $x I_{fl} = I_m$ (كل من I_{fl} و I_m يمر في نفس الملف الابتدائى أو الثانوى) ، نجد أن :

$$P_{Fe} = P_{cu} \left(\frac{I_m}{I_{fl}} \right)^2 = x^2 P_{cu}$$

$$\therefore x = \frac{I_m}{I_{fl}} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{cu}}} \dots\dots\dots (٧-١٣)$$

يتضح من المعادلة (٧-١٣) أن قيمة التيار ، التى نحصل معها على قيمة النهاية العظمى لمعامل الجودة ، بالنسبة لقيمة تيار الحمل الكامل ، تتوقف على قيمة النسبة بين مفقودات الحديد الثابتة ومفقودات النحاس عند الحمل الكامل ، التى تنغير مع مربع التيار . وقد يترأى لنا ، بناء على ذلك ، أن نراعى ، عند تصميم المحول ، أن تكون مفقودات الحديد مساوية لمفقودات النحاس عند تيار الحمل ، الذى ينتظر أن يتم تشغيل المحول به معظم الوقت ، حتى نحصل على أعلى قيمة لمعامل الجودة ، طوال وقت التشغيل تقريبا ، مما يؤدي إلى خفض قيمة الطاقة المستهلكة في المفقودات ، بالكيلووات ساعة ، وبالتالي خفض تكاليف التشغيل إلى أقصى حد ، من هذه الناحية . ولكن الحكم على ذلك يستدعى منا أن نستعرض نوعى التشغيل الرئيسية للمحول ، اللذين يحدد بناء عليهما نوعان رئيسيان للمحولات ، تختلف فيهما قيمة النسبة $\frac{P_{Fe}}{P_{cu}}$ ، وذلك كما يأتى :

١ — محولات القدرة (Power transformers) :

هذه هي المحولات التى تستخدم في عطات القوى الكهربائية ، لتحويل ضغط

الآلات المحدود إلى ضغط الإرسال العالى ، وذلك لخفض قيمة مفقودات الإرسال ، كما سبق ذكره في مطلع هذا الباب . ويكون لكل آلة محول خاص بها لآداء هذه المهمة ، بحيث يكونان معا وحدة قائمة بذاتها ، يتم تشغيلها عندما يتطلب الحمل على المحطة وجودها مع الوحدات العاملة ، وتتوقف عن العمل عندما يخف الحمل على المحطة ، بحيث يمكن أن تستوعبه بعض الوحدات الأخرى فقط ، دون أن يزداد تحميلها عن الحد المعلوم . ويراعى ، على هذا الأساس ، أن يكون عدد الوحدات العاملة بحيث يكون تحميل كل منها في حدود $\frac{1}{3}$ الحمل الكامل تقريبا ، ولا يقل عن ذلك ، على قدر المستطاع . وهذا يعنى أن محولات القدرة تعمل ، بحيث يكون تحميلها بين $\frac{1}{3}$ حمل والحمل الكامل ، فى أغلب الأحيان ، مما يجعلنا نراعى ، عند تصميم مثل هذه المحولات ، أن تكون قيمة النسبة x من 0.75 إلى 0.9 تقريبا ، أى أن نسبة مفقودات الحديد إلى مفقودات النحاس ، عند مقنن الضغط والتيار ، تتراوح بين 0.6 إلى 0.8 ، وذلك على حسب الشرط الوارد فى المعادلة (١٣ - ٧) ،

٢ - محولات التوزيع . (Distribution transformers)

وهذه هى المحولات التى تستخدم لتحويل ضغط الإرسال ، العالى نسبيا ، إلى ضغط منخفض ، يكون مناسباً لتشغيل الأجهزة الكهربائية المختلفة . ونظرا لأن مثل هذه الأجهزة تتواجد فى المنازل والورش والمحلات العامة ، ويحتمل تشغيلها فى أى وقت ، أثناء الليل أو النهار ، تظل محولات التوزيع موصلة إلى الشبوع طوال أربع وعشرين ساعة ، مما يجعلها تستهلك المفقودات الحديدية طول هذا الوقت بدون انقطاع . هذا مع أن تحميل المحول بالحمل الكامل قد لا يتجاوز بضع ساعات فى أثناء الليل والنهار ، يزيد عليها تحميله بأجزاء من الحمل ، لئلا يظل بقية

الوقت بدون حمل على الإطلاق . فإذا استوفى مثل هذا المحول شرط اعطاء قيمة النهاية العظمى لمعامل الجودة ، على نفس المنوال مثل محول القدرة ، نجد أن الطاقة المستهلكة في مفقودات الحديد بالكيلووات ساعة على مدار الأربع وعشرين ساعة تصبح كبيرة . وهذا يجعل معامل الجودة اليومى (all day efficiency) ، الذى يحسب على أساس للنسبة بين قيمة الطاقة التى يعطيها المحول ، وقيمة الطاقة التى يأخذها من الينبوع ، على مدى الأربع وعشرين ساعة ، يكون منخفضا ، بسبب ارتفاع قيمة المفقودات الحديدية نسبيا . لذلك يراعى ، عند تصميم محولات التوزيع ، أن تكون نسبة المفقودات الحديدية إلى مفقودات النحاس ، عند مقنن الضغط والتيار صغيرة ، وتراوح بين 0.15 إلى 0.3 تقريبا . وفى هذه الحالة نجد أن معامل الجودة اليومى يكون مناسباً ، على الرغم من أن معامل الجودة العادى يكون فى قيمة النهاية العظمى له عند نسبة منخفضة جدا من الحمل الكامل ، تتراوح بين حوالى 40 % ، 55 % ، التى هى قيمة η . ويمكن ايضاح هذه الحقائق فى المثال الآتى : نفرض أننا فى حالة محول للتوزيع ، الذى يعطى قدرة مخرج مقدارها 97.5 كيلووات عند الحمل الكامل ، قد راعينا أن تكون قيمة النهاية العظمى لمعامل جودة المحول البالغ قدرها 97.5 % عند الحمل الكامل . معنى ذلك أن المحول يأخذ قدرة مدخل عند الحمل الكامل مقدارها 100 كيلووات ، فتكون قيمة المفقودات 2.5 كيلووات ، منها 1.25 كيلووات مفقودات حديد ثم 1.25 كيلووات مفقودات نحاس ، لى يتحقق استيفاء شرط الحصول على η_m عند الحمل الكامل . نفترض أن هذا المحول يعمل بالحمل الكامل 6 ساعات ، وبنصف حمل 8 ساعات ، وربع حمل 4 ساعات ، وبدون حمل بقية الوقت . وفى هذه الحالة تكون الطاقة المستهلكة فى المفقودات بالكيلووات ساعة W_{24} هى :

$$W_{24} = 1.25 \times 24 + 1.25 \times 6 + 0.3125 \times 8 + 0.078 \times 4 \\ = 40.3125 \text{ K.W.H.}$$

إذا أصبحت نسبة مفقودات الحديد إلى مفقودات النحاس % 20 ، بدلا من النسبة السابقة 100% ، فإننا نحصل على قيمة النهاية العظمى لمعامل الجودة عند نسبة منخفضة من الحمل الكامل (حوالي % 44,7) . بذلك تصبح قيمة معامل الجودة أقل من η_m عند الحمل الكامل ، ولنفرض أنها أصبحت % 97 . فتكون قيمة المفقودات الكلية في المحول 3 كيلووات ، منها 0,6 كيلووات مفقودات الحديد ، ثم 2,4 كيلووات مفقودات النحاس . وفي هذه الحالة نجد أن الطاقة المستهلكة في المفقودات في الأربع وعشرين ساعة هي :

$$W_{24} = 0.6 \times 24 + 2.4 \times 6 + 0.6 \times 8 + 0.15 \times 4$$

$$= 34.2 \text{ K.W.H.}$$

مثال (١) :

a—A 10 KVA, 3300/231 V, single phase transformer gave the following test results : (i) with open circuited primary, readings on the 231 V side : 231 V, 3 amps. 110 W, (ii) with short circuited secondary, readings on 3300 V side: 100 V, 2.5 amps., 150 W. Calculate for full load current at 0.8 power factor lagging the percentage regulation, and the magnetising current

ملحوظة هامة يجب مراعاتها عند حل مسائل المحولات : الكيلو فولت أمبير (KVA) المعطى في المسألة هو عادة مقنن قدرة المخرج للمحول ، مالم يذكر خلاف ذلك . ولكننا مع ذلك نستخدمه لإيجاد كل من تيارى الملف الابتدائى والثانوى ، باعتبار ضغطى التحويل المعطيين ، كما سوف يتبين من الحاول الآتية :

$$I_1 = \frac{KVA \times 10^3}{V_1} = \frac{10000}{3300} = 3.03 \text{ amps.}$$

$$I_2 = \frac{KVA \times 10^3}{V_2} = \frac{10000}{231} = 43.3 \text{ amps.}$$

يلاحظ أن قراءات تجربة الدائرة المفتوحة قد أخذت على ناحية الضغط المنخفض 231 فولت ، لأنه ضغط مناسب ، يمكن توفره في المعمل بسهولة أكثر من الضغط 3300 فولت . كما أن قراءات دائرة القصير قد أخذت على ناحية الضغط العالي 3300 فولت ، لأن الضغط الذي نحتاج إليه لإجراء التجربة في هذه الحالة ، وهو 110 فولت ، يسهل الحصول عليه من التنبوع المعتاد ، في المعمل .

$$Z_{1eq} = \frac{110}{2.5} = 44 \text{ ohms} , \quad R_{1eq} = \frac{150}{6.25} = 24 \text{ ohms}$$

$$X_{1eq} = \sqrt{(44)^2 - (24)^2} = 36.8 \text{ ohms}$$

باستخدام المعادلة (١٠-٧) لحساب معامل التنظيم نجد أن :

$$\varepsilon = \frac{3.03 \times 24 \times 0.8 + 3.03 \times 36.8 \times 0.6}{3300} = 0.0374$$

معامل التنظيم المتوى :

$$\text{regulation per cent } 3.74 \%$$

مفقودات النحاس عند الحمل الكامل :

$$P_{cu} = \left(\frac{3.03}{2.5} \right)^2 \times 150 = 220.5 \text{ w}$$

$$\eta = \frac{10000 \times 0.8}{10000 \times 0.8 + 110 + 220.5} = 0.96 = 96 \%$$

$$\cos \phi_o = \frac{110}{231 \times 3} = 0.1585, \quad \sin \phi_o = 0.9874$$

تيار المغنطة :

$$I_{ph} = 3 \times 0.9874 = 2.9622 \text{ amps.}$$

مثال (٢) :

a 125 KVA, 6000/525 V, single phase transformer has iron losses of 1200 watts. With the secondary winding short circuited a voltage of 300 V at normal frequency applied to the primary winding produces a current of 15 amperes in it, the wattmeter reading being 1125 watts. Calculate the secondary terminal voltage and the efficiency at full load 0.8 power factor lagging. Determine also the load for maximum efficiency and the regulation.

$$I_1 = \frac{125000}{6000} = 20.8 \text{ A}, \quad I_2 = \frac{125000}{525} = 238 \text{ A}$$

$$Z_{1eq} = \frac{300}{15} = 20 \text{ ohms}, \quad R_{1eq} = \frac{1125}{225} = 5 \text{ ohms}$$

$$X_{1eq} = \sqrt{400 - 25} = 19.4 \text{ ohms}$$

باستخدام المعادلة (١٠ - ٧) نجد أن :

$$V_1 - V_2' \approx 20.8 \times 5 \times 0.8 + 20.8 \times 19.4 \times 0.6 = 325.2 \text{ V}$$

$$V_2' \approx 6000 - 325.2 \approx 5674.8 \text{ V}$$

$$V_2 \approx 5674.8 \times \frac{525}{6000} \approx 497 \text{ V}$$

$$P_{cu} = 1125 \times \left(\frac{20.8}{15}\right)^2 = 2150 \text{ w}$$

$$\eta = \frac{125000 \times 0.8}{125000 \times 0.8 + 1200 + 2150} = 0.9675 = 96.75\%$$

$$\varepsilon = \frac{325.2}{6000} = 0.054 = 5.4 \%$$

$$P_{cu} = P_{Fe} \text{ at } \eta_m \Rightarrow x^2 \times 1250 = 1200$$

$$\therefore x = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{cu}}} = \sqrt{\frac{1200}{2150}} \approx 0.75 \approx 75\%$$

: (۲) مثال

A 90 KVA, 6000/231 V, 50 c/s, single phase transformer was tested :

- (i) with the secondary winding open circuited
- (ii) with the secondary winding short circuited, and gave the following readings on the primary (6000 V) side:
 - (i) open circuit test : 6000 V, 0.65 A, at 0.4 power factor
 - (ii) short circuit test : 136 V, 10 A, at 0.5 power factor
- (a) Find the efficiency and percentage regulation at 0.8 power factor lagging, (b) What must be the magnitude of the high voltage in order that the secondary may deliver full load current at unity power factor and exactly 231 V ?

$$I_1 = \frac{90000}{6000} = 15 \text{ A} , \quad I_2 = \frac{90000}{231} = 389 \text{ A}$$

$$Z_{1eq} = \frac{136}{10} = 13.6 \text{ ohms} , \quad R_{1eq} = 13.6 \times 0.5 = 6.8 \text{ ohms}$$

$$X_{1eq} = Z_{1eq} \sin \phi_{sc} = 13.6 \times 0.866 = 11.8 \text{ ohms}$$

$$P_{cu} = 580 \times \left(\frac{15}{10} \right)^2 = 1530 \text{ W} , P_{Fe} = 6000 \times 0.65 \times 0.4$$

$$\eta = \frac{90000 \times 0.8}{90000 \times 0.8 + 1560 + 1530} = 95.8 \%$$

$$\varepsilon = \frac{15 \times 6.8 \times 0.8 + 15 \times 11.8 \times 0.6}{6000} = 3.13 \%$$

لكي يعطى الملف الثانوى 231 فولت بشروط الحمل المطلوبة يجب أن يكون :

$$V_1 = V'_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \cong [V_2 + I_2 R_{2eq} \cos \phi + I_2 X_{2eq} \sin \phi] \frac{T_1}{T_2}$$

وتستخدم هذه المعادلة التقريبية عندما يختلف معامل القدرة عن الوحدة .
أما إذا كان معامل القدرة يساوى الوحدة ، فإن $I_2 R_{2eq}$ يكون فى اتفاق مرحلى مع V_2 (و I_2 أيضا) ، كما يكون $I_2 X_{2eq}$ عموديا على V_2 ، كما ينضج من مراجعة شكل (١٠-٧ب) . وفى هذه الحالة يمكننا حساب قيمة V_1 بالضبط على النحو التالى :

$$V_1 = [\sqrt{(V_2 + I_2 R_{2eq})^2 + (I_2 X_{2eq})^2}] \frac{T_1}{T_2}$$

$$= \frac{6000}{231} \sqrt{(231 + 3.92)^2 + (6.8)^2} = 6110 \text{ V}$$

مثال (٤) :

The following test results were obtained for a 500 KVA,
10000/525 V, 50 c/s, star/star, 3 phase transformer :
(a) With the primary side open circuited, readings
on the star connected 525 V side were ; 525 V, 2.1

KW, 27.5 A. (b) With the 525 V side short circuited, readings on the star connected 10000 V side were : 220 V, 1.1 KW, 10.5 A.

Calculate the efficiency and percentage regulation at full load 0.8 power factor lagging as well as the magnetising current. State whether this transforme is a power or a distribution one, and explain in which respects are these two types of transformers different from each other.

يكون حل هذه المسألة على نمط حل المسائل السابقة ، مع مراعاة القيم للمرحلية في خلال الحل ، وذلك على حسب نوع التوصيل ، نجمة أو دلتا .

(التيار المرحلي = التيار الخطي) :

$$I_1 = \frac{500 \times 1000}{\sqrt{3} \times 10000} = 28.85 \text{ A}$$

(التيار المرحلي = التيار الخطي)

$$I_2 = \frac{500 \times 1000}{\sqrt{3} \times 525} = 549 \text{ A}$$

$$Z_{1eq} = \frac{220}{\sqrt{3} \times 10.5} = 12.2 \text{ ohms} \left(\frac{220}{\sqrt{3}} \text{ الضغط المرحلي} \right)$$

$$R_{1eq} = \frac{1100}{3 \times (10.5)^2} = 3.33 \text{ ohms} \left(W_s = \frac{1100}{3} \text{ لكل مرحلة} \right)$$

$$X_{1eq} = \sqrt{(12.1)^2 - (3.33)^2} = 11.6 \text{ ohms}$$

$$P_{cu} = 1100 \times \left(\frac{28.85}{10.5} \right)^2 = 8300 \text{ W}$$

$$\varepsilon = \frac{28.85 \times 3.33 \times 0.8 + 28.85 \times 11.6 \times 0.6}{5780}$$

$$= 4.76 \% \quad \left(5780 = \frac{10000}{\sqrt{3}} = V_1 \text{ الضغط المرحلي} \right)$$

$$\eta = \frac{400000}{400000 + 2100 + 8300} = 97.3 \%$$

$$\frac{P_{Fe}}{P_{cu}} = \frac{2100}{8300} = 0.253$$

المحول يستخدم في أغراض التوزيع ، أى أنه محول توزيع ، ويرجع إلى ما كتب في هذا الباب بخصوص الفرق بين محولات القدرة ومحولات التوزيع .

مثال (٥) :

When testing a 200 KVA, 13200/1200 V, 50 c/s, star/delta, 3-phase transformer, it gave the following results; (i) readings on the 1200 V side (line values), with the primary side open circuited, 1200 volts, 3 amps., 2.6 K.W. (ii) Readings on the 1200 V-side (line values) while the 13200 V side is short circuited, 80 volts, 91 amps., 2.5 K.W. Calculate the efficiency and percentage regulation at full load and 0.8 power factor lagging. What value of the primary voltage would give a secondary voltage of 1200 volts at full load and unity power factor ? Calculate the efficiency and percentage regulation in this case.

(التيار المرحلي = التيار الخطي) :

$$I_1 = \frac{200 \times 1000}{\sqrt{3} \times 13200} = 8.78 \text{ A}$$

(التيار الخطي : $\sqrt{3} \times 55.7 = 96.3$)

$$I_2 = \frac{200 \times 1000}{3 \times 1200} = 55.7 \text{ A}$$

$$Z_{2eq} = \frac{80}{91/\sqrt{3}} = 1.524 \text{ ohms} \left(\frac{91}{\sqrt{3}} \text{ التيار المرحلي} \right)$$

$$R_{2eq} = \frac{2500}{3 \times (91/\sqrt{3})^2} = 0.303 \text{ ohms}$$

$$X_{2eq} = \sqrt{(1.524)^2 - (0.303)^2} = 1.495 \text{ ohms}$$

$$P_{cu} = 2500 \times \left(\frac{96.3}{91} \right)^2 = 2810 \text{ W}$$

$$\epsilon = \frac{55.7 \times 0.303 \times 0.8 + 55.7 \times 1.495 \times 0.6}{1200} = 5.3 \%$$

$$\eta = \frac{160000}{160000 + 2600 + 2810} = 96.6 \%$$

$$V'_1 = \sqrt{(1200 + 16.9)^2 + (83.2)^2} = 1222$$

$$V_1 = 1222 \times \frac{13200}{1200} = 13440 \text{ V}$$

$$\epsilon_{\cos \phi} = 1 = \frac{0.303 \times 55.7}{1222} = 1.37 \%$$

يمكن للحصول على قيمة أدق لـ V'_1 (أو V_1) ، في هذا المثال أو الأمثلة السابقة ، استخدام المعادلة (١١-٧) ، ثم المعادلتين (٨-٧) ، (٩-٧) ، بدلا من استخدام المعادلتين (١٠-٧) ، (١١-٧) ، ولكنك سوف تجد أن الفرق في النتائج لا يذكر ، ولا يستاهل فرق الجهد.

مثال (٦) :

It is required to buy a distribution transformer rated 1500 KVA at 0.8 power factor lagging, to be operated in the following manner during the year ; Full load for 2800 hours, half load for 1600 hours, $\frac{1}{4}$ full load for 1400 hours and the rest of the year on no load. State which of the following two transformers would you choose, if they have the following specifications;

Transformer A ; η at full load 98.5 % and $P_{Fe} = 4.25$ KW

Transformer B : η at full load 98.1 % and $P_{Fe} = 6.5$ KW

Transformer A costs 200 pounds more then transformer B and 1 KWH costs 4 milliems. assume cost of interest and depriiation for money investment 12 % .

تكون المفاضلة بين المحولين على أساس الناحية الاقتصادية ، وذلك باعتبار
أنهما قد استوفيا جميع الشروط من ناحية المواصفات الفنية. لذلك نختار المحول الذي
يكلفنا الثمن الأقل . ويلاحظ أن الثمن هنا يشتمل على شقين ، فهناك الثمن الاسمي
الذي ندفعه عند شراء المحول ، وهناك ثمن تكاليف تشغيل المحول ، والمفروض
أنها تختلف من محول إلى آخر بسبب اختلاف المفقودات في كل منهما ، التي تعنى
زيادة غير مستفاد بها في ثمن الطاقة المستهلكة . ولكي تكون المقارنة على أساس
سليم ، فإن الزيادة في ثمن أحد المحولين على الآخر تحول إلى دفعة سنوية مستهلكة
من رأس المال ، تضاف مع فوائدها إلى ثمن المفقودات في المحول الأعلى سعراً ،
وذلك بسعر الفائدة والاستهلاك (cost of interest and depriiation)
المعطى .

$$A - P_{cu} + P_{Fe} = \frac{1500 \times 0.8}{0.985} \times 0.015 = 18.25 \text{ KW} ,$$

$$P_{cu} = 14 \text{ KW}$$

$$B - P_{cu} + P_{Fe} = \frac{1500 \times 0.8}{0.981} \times 0.019 = 23.25 \text{ KW} ,$$

$$P_{cu} = 16.75 \text{ KW}$$

(السنة 8760 ساعة) :

$$A - W_{24} = 8760 \times 4.25 + 2800 \times 14 + 1600 \times 3.5 \\ + 1400 \times 0.875 = 83274 \text{ KWH}$$

التكاليف السنوية للطاقة المستهلكة في المفقودات بالجنيه :

$$83274 \times \frac{4}{1000} = 333.096$$

$$B - W_{24} = 8760 \times 6.5 + 2800 \times 16.75 + 1600 \times 4.188 \\ + 1400 \times 1.047 = 112016 \text{ KWH}$$

التكاليف السنوية للطاقة المستهلكة في المفقودات بالجنيه

$$112016 \times \frac{4}{1000} = 448.64$$

$$\text{الدفعة السنوية لزيادة ثمن A بالجنيه } 24 = 200 \times \frac{12}{100} \text{ تضاف اليها}$$

تكاليفه السنوية ، فتصبح التكاليف الكلية لـ A ، التي تجرى على أساسها المقارنة ، هي 357.096 جنيه .

نجد على هذا الأساس أن المحول A يفضل المحول B ، بسبب الوفر الذي يحققه ، والذي يبلغ 90.968 جنيها سنويا ، ولذلك نختاره .

مسائل على الباب السابع

- 1 — A 1 — phase, 50 cycle, core — type transformer has square cores of 20 — cm side. The permissible max. flux density is 10000 lines per cm^2 . Calculate the number of turns per limb on the high — and low — voltage sides for a 3000/220 — V ratio.
- 2 — Determine the number of turns per phase in each winding of a 3 — phase transformer with a ratio of 20000/2000 V, to work on a 50 — cycle network. The high — voltage winding is delta — connected and the low — voltage is star — connected. Each core has a cross section of 560 cm^2 . Assume a flux density of about 12000 lines per cm^2 .
- 3 — A 50 — cycle, 3 — phase, core — type transformer is to be built for a 10000/500 — V ratio, connected star/mesh. The cores are to have a square section and the coils are to be circular. Taking an induced electromotive force of about 15 V per turn, and a maximum core density of about 11000 lines per cm^2 determine the cross — sectional dimensions of the core, the diameter of the circumscribing circle, and the numbers of turns per phase.
- 4 — A 1 — phase transformer has 180 and 90 turns respectively in its secondary and primary windings. The respective resistances are 0.233 Ω and 0.067 Ω . calculate the equivalent resistance of (a) the primary in terms of the secondary winding, (b) the secondary in terms of the primary winding, and (c) the total

resistance of the transformer in terms of the primary.

- 5 — calculate in terms of the primary the effective (equivalent) resistance and the leakage reactance of a transformer which gave the following data on test with the secondary terminals short-circuited : Applied voltage, 60 V, current, 100 A, power input, 1.2 KW.
- 6 — A 50—cycle 1 — phase transformer has a turn — ratio of 6. The resistances are $0.90\ \Omega$ and $0.03\ \Omega$, and the reactances $5\ \Omega$ and $0.13\ \Omega$ for high — voltage and low — voltage windings respectively. Find (a) The voltage to be applied to the high — voltage side to obtain full — load current of 200 A in the low — voltage winding on short — circuit, (b) The power — factor on short circuit.
- 7 — Find the efficiency of a 150 — KVA transformer at 25 % , 33 % and 100 % full — load, (a) at unity power factor, (b) at power factor 0.8 lagging, if the copper loss is 1600 W at full load and the iron loss is 1400 W. Ignore the effects of temperature rise and magnetising current.
- 8 — In a 25 — KVA, 2000/200 — V transformer the iron and copper losses are 350 and 400 W respectively — calculate the efficiency on unity power factor at (a) full — load and (b) half — load (c) Determine the load for maximum efficiency and the iron and the copper loss in this case.
- 9 — calculate the efficiencies at half — , full — and $1\frac{1}{4}$ — load of a 100 — KVA transformer for power factors

of (a) unity, (b) 0.8. The copper loss is 1000 W at full — load and the iron loss is 1000 W.

- 10 — A 125 — KVA transformer with a copper loss of 1.5 KW at full — load, and iron loss 1 KW, has the following equivalent annual load conditions :

full — load at 0.8 Power factor for 2000 hours

one — third load 0.8 power factor for 3000 hours

no — load for the remainder of the year

Find the annual cost of running with energy at 4m. Per KWH.

- 11 — A 100 — KVA, 1000/10000 — V, 50 — cycle transformer has an iron loss of 1200 W. The copper loss with 6 A in the high — voltage winding is 500 W — calculate the efficiencies at (i) 25 % , (ii) 50 % and (iii) 100 % of normal load, for power factors of (a) 1.0 and (b) 0.8 , the output terminal voltage being maintained at 10000 V. Find also the load for maximum efficiency at both power factors.

- 12 — A 16000 — KVA, 3 — phase transformer with a voltage ratio of 4000/56000 V, star/star, gave the following test results ; Resistance per phase, 0.004 and 0.6 Ω , measured loss on short - circuit with full - load current, 134 KW. Calculate the average eddy - loss ratio, i.e. the ratio of effective resistance/ ohmic resistance.

- 13 — A 100 . KVA, 6600/330 . V, 50 cycle, 1 - phase transformer took 10A and 436W at 100V in a short-circuit

test, the figures referring to the high - voltage side. calculate the voltage to be applied to the high-voltage side on full-load at power factor 0.8 lagging when the secondary terminal voltage is 330 V.

14 — A 4 - KVA, 200/400 - V, 50 - cycle, 1 - phase transformer gave the following test figures ; No - load low - voltage data, 200 V, 0.7 A, 60 W. short - circuit : high - voltage data, 9 V, 6 A , 21.6 W. calculate (a) the magnetising current and the component corresponding to iron loss at normal voltage and frequency , (b) the efficiency on full load at unity power factor, (c) the secondary terminal voltage on full load at power factors of unity, 0.8 lagging and 0.8 leading.

15 — A 110 - KVA, 1 - phase transformer has a ratio of 11000/440 V. The iron loss measured on open - circuit is 1100 W. with the secondary winding short - circuited a voltage of 500 V at normal frequency applied to the primary produces full - load current, the wattmeter reading 1000 W. Calculate (a) the secondary terminal voltage, (b) the efficiency, when a current of 250 A at a lagging power factor of 0.8 is taken by a load connected to the low - voltage terminals, the primary voltage being 11000 V.

16 — Calculate (a) the full - load efficiency at unity power factor, (b) the voltage at the secondary terminals when supplying full - load secondary current at power factors (i) unity, (ii) 0.8 lagging, (iii) 0.8 leading, for the 4 - KVA, 200/400 - V, 1 - phase transformer

of which the following are the test figures : Open circuit with 200 V applied to primary winding : Current 0.8 A power 70 W. Short circuit with 17.5 V applied to secondary (high-voltage) side : Current 9 A, power 50 W .

- 17 — A transformer has resistance and reactance drops of 2.5% and 5 % respectively. Plot a curve showing the percentage voltage regulation on full load as a function of power factors between zero lagging and zero leading. The simplified formula may be used. Find the maximum regulation and the power - factor at which this occurs.

- 18 — Derive the equation of performance of a transformer and show that it may be represented by any one of three equivalent circuits with equal accuracy. The following test figures were obtained for a transformer:

Open - circuit test ;	Primary voltage	= 11000 V
	secondary voltage	= 112 V
	Primary current	= 49 MA
	Primary power	= 280 W
Short - circuit test ;	Primary voltage	= 680 V
	Primary current	= 3 A
	Primary power	= 410 W

The transformer was then used to supply a load of 20 KW at 110 V and at a power factor of 0.8 , current lagging. What were the Primary voltage and current?

- 19 — Derive an expression for the approximate value of

the voltage regulation of a transformer in terms involving the equivalent resistance and leakage reactance of the windings and the phase angle of the load.

- 20 — A single - phase, 600 — KVA, 11/33 — KV transformer has its maximum efficiency at 0.7 of full - load current.

The resistance and leakage reactance of the primary winding are 1.2Ω and 7.0Ω respectively and the corresponding values for the secondary winding are 10Ω and 60Ω respectively. Calculate (a) the percentage voltage regulation on full load 0.8 power factor lagging and (b) the efficiency of the transformer on full load, 0.8 power factor.

- 21 — A 100 - KVA transformer has a no load loss of 1 KW, and a total loss of 2 KW when supplying a load of 100 KVA at 0.5 power. What is the efficiency when supplying a load of 50 KVA at unity power factor ?

- 22 — A 50 KVA, 50 - c/s, 3300/250 - V single - phase transformer gave the following test results :

High - voltage winding open - circuited, low - voltage winding supplied : 250 V , 200 W, 5 A.

Low - voltage winding short - circuited, high - voltage winding supplied : 144 V, 400 W, 15.1 A.

Determine the approximate equivalent circuit of the transformer, referred to the low - voltage side.

- 23 — What is the condition for maximum efficiency in a transformer ? Give the mathematical proof.

- In a 25 KVA, 2000/200 V transformer the iron and copper losses are 350 W and 400 W respectively. Calculate the efficiency on unity power factor at (a) full load and (b) half load. (c) Determine the load for maximum efficiency and the iron and the copper lost in this case,
- 24 — A 10000 V, 25 c/s transformer has copper, hysteresis and eddy current losses of 1.5, 0.7 and 0.4 % of the output. What will the percentage losses become if the transformer be used on a 20000 V, 50 c/s system, assuming the full load current to be the same ? Compare the full load efficiencies at the two frequencies.
- 25 — The efficiency of a 400 KVA, single phase transformer is 98.77 % when delivering full load at 0.8 power factor, and 99.13 % at half load and unity power factor. Calculate :
- (i) the iron loss.
 - (ii) the full load copper loss.
 - (iii) the load for maximum efficiency in KVA, and the copper loss in this case.
- 26 — The following data were obtained for a 20 KVA, 60 c/s, 2400/240 volt, single phase transformer, tested at 60 c/s. With the high voltage winding open circuited, the voltage was 240, current 1.066 amp. and the power 126.6 W, while with the the low voltage terminals short circuited the applied voltage was 57.5, the current 8.34 amp and the power 284

W ; a — Compute the efficiency and regulation for full load current at 0.8 p.f. lagging. b — Find the load power factor for which the efficiency of the transformer at rated KVA load is 0.96. c — Assume that the load power factor is varied while the load current and secondary terminal voltage are held constant, determine the load power factor for which the regulation is maximum. Find this regulation.

27 — A 100 KVA, 6600/330 V, 50 c/s, single phase transformer was tested :

- (i) With the secondary winding open circuited.
- (ii) With the secondary winding short circuited.

and gave the following reading on the primary (6600V) side.

- (i) open circuit test 6600 v, 0.6 amp, at 0.4 power factor.
- (ii) short circuit test 150 v, 10 amps, at 0.5 power factor.

(a) Calculate the elements of the magnetising impedance X_o & R_o , and the efficiency at full load 0.8 power factor lagging.

(b) What must be the magnitude of the high voltage in order that the secondary may deliver full load current at unity power factor and exactly 330 v ?

28 — A 300 KVA, 6600/400 V, 50 c/s, delta/star, 3 phase transformer gave the following test results (line values) . (i) With open-circuited primary, readings on the 400 V side (star connected) are 400 V, 1.8 KW, 21.7 amps. (ii) With short-circuited secondary, readings on the 6600 v side (delta connected) are 110 v, 13.1 amps, 940 w.

Calculate for full load current at 0.8 power lagging the efficiency and percentage regulation. Find also the magnitude of the primary voltage so that the secondary may deliver full load at unity power factor at exactly 400 V.

29 — A 110 KVA, single phase transformer has a ratio of 11000/440 V. The iron loss measured on open circuit is 1100 W. With the secondary winding short circuited, a voltage of 500 V at normal frequency applied to the primary produces full load current, the wattmeter reading 1000 W. Calculate :

(a) the secondary terminal voltage and the efficiency, when a current of 250 A at a lagging power factor of 0.8 is taken by a load connected to the low voltage terminals, the primary voltage being 11000 V.

(b) the values of the hysteresis and eddy current iron losses for operation with 50 c/s, given the following open circuit data :

Voltage applied to low voltage side	440	330	220	110
frequency c/s	50	37.5	25	12.5
Power input in watts	1100	760	460	205

30 — A 50 KVA, 6000/400 V single phase transformer gave the following test results : (i) With open circuited primary, readings on the 400 V side : 400 V, 10 amps, 800 watts, (ii) With short circuited secondary, readings on the 6000 V side : 200 V, 7.2 amps, 850 watts,

- (a) Calculate for full load current at 0.8 power factor lagging, the efficiency and percentage regulation.
- (b) What must be the magnitude of the primary voltage so that the secondary may deliver full load at unity power factor at exactly 400 V.

الباب الثامن

توصيلات المحولات وتشغيلها على التوازي

(Connections and parallel operation of the transformers)

أولاً - التوصيلات المختلفة للمحولات

صيانة المحولات : (Maintenance of transformers)

معظم المحولات الحديثة ، حتى الأحجام الصغيرة منها ، التي لا يزيد مقنن قدرتها عن بضعة كيلو فولت أمبير ، تكون مغمورة في الزيت . ومن المعتاد أن يخرج المحول من المصنع ، ويرسل إلى مكان تشغيله وصهريج الزيت (oil tank) الذي يحتوى على المحول ، ممتلئ بالزيت ، وذلك لكي نتفادى تشرب المواد العازلة على الملفات بالرطوبة . ويكون ملء الصهريج بالزيت حتى علامة معينة ، مبيضة على الصهريج . وعندما يحتاج المحول إلى تجفيف (drying out) من آثار الرطوبة فإنه يلف في الخيش ، ويسخن بعمل دائرة قصر على الملف الثانوى ، وتقاس درجة حرارة الطبقة العلوية للزيت ، في أثناء ذلك ، باستخدام ترمومترات كحولية ، حيث يراعى ألا تزيد درجة حرارة الزيت عن 90 درجة مئوية . وتوقف عملية التسخين في فترات ، تقاس خلالها مقاومة العزل للمواد العازلة ، التي لا يجب أن تقل حينئذ عن 20 مجا أوم تقريبا .

يجب توصيل الصهريج بالأرض (earthing of the tank) دائما قبل تشغيل المحول ، كما يستحسن أن يكون المحول قائما على أرض صلبة (hard

(floor ، مثل الخرسانة المسلحة (reinforced concrete) ، وذلك تلافياً لحدوث الاهتزازات .

وتبدأ عملية الصيانة ، بالنسبة للمحولات الجديدة ، بعد بضعة شهور فقط من بدء تشغيلها ، وذلك بالمراجعة على جميع التوصيلات ، وإعادة ربط المسامير جيداً . كما يفحص الزيت جيداً بحثاً عن الرواسب (sludge) ، التي يمكن أن تتكون فيه بمرور الوقت ، والتي يجب عند وجودها التخلص منها بأسرع ما يمكن ، وذلك بترشيح الزيت في مرشح خاص (filter) لهذا الغرض .

بعض أسباب الانهيار في المحولات :

(Some causes of failure in transformers)

نورد فيما يلي بعض أسباب الانهيار التقليدية (typical causes of failure) التي تحدث عادة في المحولات :

١ — حدوث دائرة قصر بين الملفات بعضها البعض : وقد ينشأ ذلك نتيجة للاجهادات الميكانيكية ، بسبب شدة الربط على الملفات ، أو نتيجة للتسخين الزائد في بعض المواضع ، الذي قد ينشأ عن أسباب متعددة ، أو نتيجة لحدوث اندفاعات ضغطية أو ضغوط عارمة (surge voltages) ، بفعل قفل أو فتح الدائرة ، أو بفعل الظواهر الطبيعية .

٢ — ازدياد المنقودات الحديدية بصورة كبيرة عن الحد المعين لها ، وقد يحدث ذلك بسبب انهيار العازل الذي يحيط بمسامير الربط ، نتيجة لتفكك مسامير ربط الرقائق ، وما يلي ذلك من حدوث اهتزازات شديدة في القلب الحديدي .

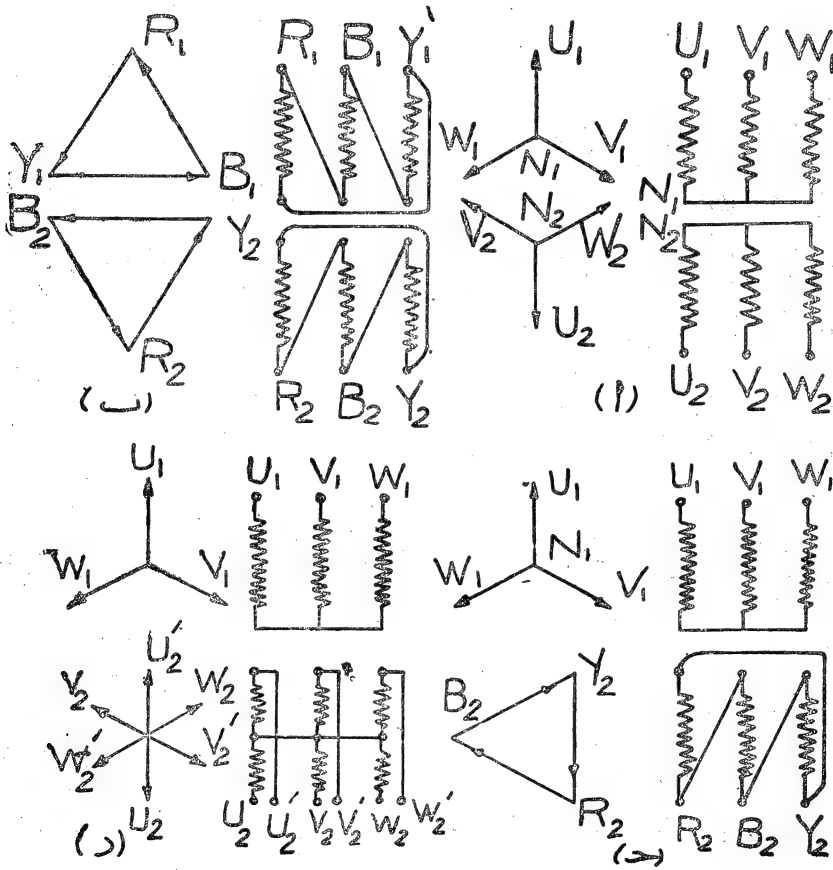
٤ - انهيار في المواد الغازية ، وذلك بسبب امتصاص الزيت لبعض الرطوبة .

٥ - ازدياد درجة حرارة المحول عن الحد المعروف ، وذلك بسبب تعسدى الحمل ، أو وجود توصيلات خاطئة ، أو بسبب سوء التهوية ، أو غير ذلك من الأسباب التى تؤدى إلى زيادة المفقودات في المحول عن تلك التى تناظر الحمل الكامل .

المحولات ثلاثية المراحل :

يمكن الحصول على محول ثلاثى المراحل بتوصيل ملفات ثلاثة محولات مفردة المرحلة ، بنفس الطريقة التى توصل بها ملفات المراحل الثلاث في محول ثلاثى المراحل . وقبل أن نستطرد في استعراض بعض التوصيلات الهامة للمحولات ثلاثية المراحل ، كما نحصل عليها في كلتا الحالتين ، نشير باختصار إلى الفروق الجوهرية التى قد تميز إحدى الحالتين عن الأخرى : يمتاز المحول ثلاثى المراحل عن ثلاثة محولات مفردة المرحلة ، موصلة بنفس الطريقة ، بأنه أقل ثمنا ، بطبيعة الحال ، ويحتل حيزا أقل ، كما هو مبين في شكل (٢-٨ ب) . هذا بينما تمتاز ثلاثة محولات مفردة المرحلة ، حين تعمل بدلا من محول ثلاثى المراحل بالمميزات الآتية : أ - يمكن الاحتفاظ بمحول واحد مفرد المرحلة كاحتياطي ، لاستخدامه عند الطوارئ ، وذلك إذا حدث عطل في أحد المحولات . أما في حالة استخدام محول ثلاثى المراحل ، فإنه يلزم الاحتفاظ بمحول مماثل ثلاثى المراحل ، كاحتياطي (reserve) . وهذا يعنى أننا نحتفظ في الحالة الأولى باحتياطي (رأس مال معطل) يوازى ثمنه ثلث رأس المال الأصلى ، بينما نضطر في الحالة الثانية إلى الاحتفاظ باحتياطي يوازى ثمنه رأس المال الأصلى بأكمله .

ب - إذا حدث عطل (fault) ، في أحد المحولات الموصلة دلتا ، يمكن استبعاد هذا المحول ، دون أن ينقطع التيار عن أى خط من الخطوط الثلاثة ، سواء من ناحية الينبوع أو من ناحية الحمل ، شكل (٢ - ٨) . وفي هذه الحالة يعمل المحولان الباقيان وهما موصلان دلتا مفتوحة (open delta) ، وكل ما يجب عمله في هذه الحالة هو تخفيض الحمل على المراحل الثلاث ، حتى يصبح



شكل (١ - ٨)

التيار الخطي $I = 0.58 I$ ، حيث I هو تيار الخط في الأحوال المعتادة ، وذلك حتى لا يأخذ أى من المحولين الباقيين حملاً زائداً يرهقه . يكون الحل الكلى على المحولين في هذه الحالة $V_1 I$ (في مقابل $V_1 I / \sqrt{3}$ باعتبار معامل القدرة الواحدة عندما تعمل المحولات الثلاثة) ، يخص كل محول منها النصف أى $0.5 V_1 I$ ، حيث $I / \sqrt{3}$ هو تيار الحمل الكامل للمحول $(V_1 I / \sqrt{3})$

توجد طرق كثيرة ، لا يمكن حصرها في هذا المجال ، لتوصيل الملفات الابتدائية ، والملفات الثانوية ، كما هي ، أو بعد تجزئتها بحسابات معينة ، سواء في المحول ثلاثى المراحل ، أو في حالة ثلاثة محولات مفردة المرحلة ، معدة لتوصيلها ثلاثية المراحل ، وذلك للحصول على مخطط متجهات يفي بمتطلبات خاصة ، لإستخدام المحول في أغراض معينة . ويمكن على كل حال تلخيص معظم القواعد العامة ، التى تتحكم في مثل هذه التوصيلات ، والتى على مداها يمكن رسم مخطط المتجهات ، في القاعدتين الآتيتين :

١ - بالنسبة للمفاين الموضوعين على نفس الساق في القلب الحديدى ، يكون ضغط الينبوع الموصل إلى أحدهما (ويطلق عليه اسم الملف الابتدائى في هذه الحالة) في اختلاف مرحلى 180° مع الضغط الذى نحصل عليه من الملف الآخر (الذى يسمى بالملف الثانوى في هذه الحالة) ، كما هو واضح في مخطط متجهات المحول بدون حمل .

٢ - تكون الضغوط الثلاثة ، على الملفات الابتدائية الثلاثة ، في أى حالة ، متساوية ومتزنة ، ومختلفة عن بعضها البعض مرحلياً بزاوية مقدارها 120° ، بين كل اثنين متعاقبين منها .

نورد فيما يلي الخصائص المميزة لبعض التوصيلات الهامة ، التي يكثر استخدامها في الحياة العملية ، وهى مبينة فى شكل (١-٨ ، ب ، ج ، د) ، وكذلك فى شكل (٢-٨) .

١ — التوصيل نجمة / نجمة (star/star connection) :

يستخدم هذا النوع من التوصيل عادة مع المحولات الصغيرة ذات الضغط العالى من نوع القلب الحديدى ، حتى يكون عدد اللفات ، والضغط على كل لفه منها صغيراً نسبياً ، مما يؤدى إلى الاقتصاد فى وزن النحاس ومواد العزل ، وبالتالي فى سعر المحول . كما يمكن الاستفادة فى هذه الحالة بنقطة النجمة لإستخدام موصل رابع ، إذا لزم الأمر . شكل (١-٨) .

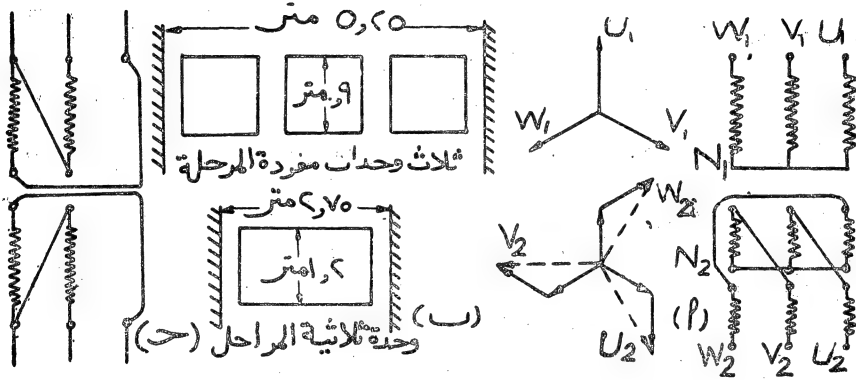
٢ — التوصيل دلتا / دلتا (Delta / delta connection) :

يصبح هذا النوع من التوصيل اقتصادياً فى حالة المحولات الكبيرة ذوات الضغوط المنخفضة ، حيث يزداد فيها عدد اللفات المرحلية ، ولكن مع انخفاض فى مساحة مقطع الملفات . ويمتاز هذا النوع من التوصيل على سابقه ، فى إحتمال للتشغيل بدلتا مفتوحة ، كما سبق شرحه ، شكل (٢-٨) .

٣ — التوصيل نجمة / دلتا (Star / delta connection) :

يستخدم هذا النوع من التوصيل عادة مع محولات القدرة . وهو يمتاز بوجود نقطة نجمة تصلح فى بعض أغراض التحميل ، مع وجود دلتا تعطى مساراً لتوافقية التيار ذات الدرجة الثالثة ، مما يساعد على تحديد ضغط نقطة النجمة ، وبالتالي اتزان الضغوط المرحلية . وإذا كان التوصيل نجمة ناحية الضغط العالى ، فإنه يمكن الاقتصاد فى ثمن المواد العازلة ، كما سبق شرحه فى حالة التوصيل

نجمية/نجمية . ولكن المعتاد عموما توصيل ناحية الضغط العالي دلنا ، عندما يراد تشغيل محركات ، وأحمال اضاءة ، باستخدام أربعة أسلاك ، ناحية الضغط المنخفض . شكل (٨-١) .



شكل (٨-٧)

٤ - التوصيل نجمية / متعرج (Star / zigzag) :

يستخدم هذا النوع من التوصيل عادة مع وحدات التيار (rectifiers) ، للحصول على خصائص معينة ، كما أن التوصيل المعكوس أى متعرج/نجمية يستخدم بدلا من التوصيل دلنا في بعض الحالات في المحولات ذوات الضغط العالية ، شكل (٨-٢) .

٥ - التوصيل ثلاثي المراحل / سداسي المراحل :

(Three - phase to six - phase connection) :

يستخدم هذا النوع من التوصيل للحصول على ست مراحل لتشغيل المحولات المتزامنة (synchronous converters) ، وكذلك لاستعماله مع وحدات التيار ذوات ستة المصاعد ، شكل (٨-٣) .

التوصيل من ثلاث مراحل الى مرحلتين :

(Three - phase to two - phase connections) :

نحتاج أحيانا إلى تشغيل أجهزة ثنائية المرحلة (two-phase) من ينبوع ثلاثي المراحل . كما يحدث عند تشغيل الأفران ثنائية المرحلة (two-phase furnaces) من ينبوع ثلاثي المراحل . كما أن العكس قد يحدث ، بمعنى أننا قد نحتاج إلى استخدام ينبوع ثنائي المرحلة لتشغيل أجهزة ثلاثية المراحل . وفي كلتا الحالتين تستخدم المحولات بتوصيلات معينة ، للربط بين المجموعة ثلاثية المراحل (3-phase system) والمجموعة ثنائية المرحلة (two-phase system) . وهناك طرق كثيرة معروفة لتنفيذ ذلك ، أهمها طريقة سكوت ، التي نقوم بشرحها فيما يلي .

طريقة سكوت للربط بين مجموعة ثلاثية المراحل وأخرى ثنائية المراحل :

(Scott method for interconnection between two and three phase systems) .

يستخدم في هذه الحالة محولان مقنن قدرتهما واحد تقريبا ، ويحتوى أحدهما على عدد من اللفات مقداره T_1 ، والثاني T'_1 في ناحية ، وهي التي يتم توصيل المجموعة ثلاثية المراحل عليها ، وكل منهما على عدد من اللفات T_2 في الناحية الأخرى ، وهي التي يتم توصيل المجموعة ثنائية المرحلة عليها ، كما هو مبين في شكل (٣ - ٨) . تقسم ملفات أحد المحولين T'_1 عند النقطة N ، بحيث يقع بين طرف المجموعة الثلاثية u ، التي توصل مع الطرف الأول لهذه الملفات ، ونقطة التوصيل N ، الموصلة إلى نقطة النجمة في المجموعة الثلاثية ، عدد من اللفات يساوى $0.576 T_1 = \frac{T_1}{\sqrt{3}}$.

وهكذا يصبح الضغط لكل لفة E_t بالنسبة للقات UN وعددها $\frac{T_1}{\sqrt{3}}$ ، أو
القات NP وعددها $\frac{T_1}{2\sqrt{3}}$ ، أو القات UP وعددها $\frac{\sqrt{3} T_1}{2}$ ، أو القات
WV وعددها T_1 ، واحدا ، حيث نجد أن الضغوط على هذه القات هي على
الترتيب V_L ، $\frac{\sqrt{3} V_L}{2}$ ، $\frac{V_L}{2\sqrt{3}}$ ، $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$

$$E_t = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \div \frac{T_1}{\sqrt{3}} = \frac{V_L}{2\sqrt{3}} \div \frac{T_1}{2\sqrt{3}}$$

$$= \frac{\sqrt{3} V_L}{2} \div \frac{\sqrt{3} T_1}{2} = \frac{V_L}{T_1} \dots\dots (A-1)$$

وبالنسبة للمقات الثانوية في كلا المحولين ، نجد أن قيمة الضغط على كل منها
وعدد لقاته T_2 ، هو $V_L \frac{T_2}{T_1} = V_2$. ويكون الضغطان متعامدين ، بحيث
يمثلان بذلك مجموعة ثنائية المرحلة ، كما يتضح من شكل (٣-٨) . ومن
البديهي أنه عند عكس الأوضاع ، أى عندما يوصل إلى المقات T_2 في المحولين
ضغطا ينبوع كهربى متماثلان ، ثنائيا المرحلة V_2 ، نحصل بين الأطراف U, V, W
على ضغوط خطية متماثلة ، ثلاثية المراحل V_L ، بحيث تكون قيمة V_L هي
• $V_2 \frac{T_1}{T_2}$

عندما يكون الحمل على المجموعة ثنائية المراحل متماثلا ، أو متزنا . ويتمثل
في تيار قيمته I_2 ، يمر في كلا الملفين T_2 ، ويكون في اتفاق مرحلى مع الضغط
على طرفي كل منها ، يمر في المقات UP التيار I'_1 بحيث يكون :

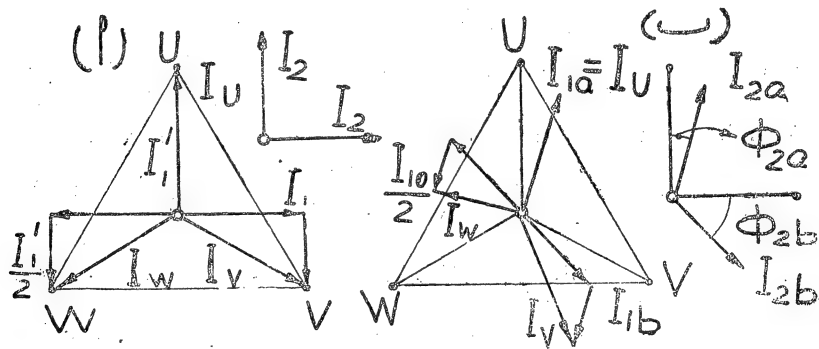
$$I'_1 = I_{2a} \times \frac{T_2}{T'_1} = I_{2a} \times \frac{T_2}{\frac{\sqrt{3}}{2} T_1} = 1.15 \frac{T_2 I_{2a}}{T_1} (A-2)$$

ويكون هذا هو التيار في الخط المتصل بالطرف U ، وهو يمر في جميع اللفات T'_1 ، أو بمعنى آخر في المرحلة UN من المجموعة الثلاثية ، وفي الجزء من اللفات NP .

لكي نحصل على التيارين الباقيين في المجموعة الثلاثية ، وهما الماران في الطرفين W, V ، يجب أن نراعى أن مجموع التيارات الثلاثة عند P يجب أن يساوى صفراً عند أية لحظة . لذلك يجب أن يحتوى كل من هذين التيارين على مركبة تساوى وتضاد $\frac{I'_1}{2}$ ، علاوة على المركبة I_1 ، التي تمر لكي تعطى التبادل في الأمبير لفات بين كل من T_2 عندما يمر فيها التيار I_{2b} ، و T_1 عندما يمر فيها التيار I_1 حيث :

$$I_1 = \frac{I_{2b} T_2}{T_1} \dots \dots \dots (٧-٣)$$

ويتضح من شكل (٤-أ) أن التيارين في الخطين المتصين بالطرفين



شكل (٤-أ)

W, V ، وهما I_W ، يكونان على هذا الأساس مساويين في القيمة للتيار I_{1f} ،

كما أن التيارات الثلاثة تكون مجموعة ثلاثية متزنة ، وذلك عندما يكون I_{2a} يساوى I_{2b} في القيمة ويتفق معه مرحلياً ، أى عندما تكون المجموعة الثنائية متزنة . ويكون $I_{2a} = I_{2b} = I_2$ في هذه الحالة .

شكل (٤-٨) يبين كيف تكون تيارات المجموعة الثلاثية غير متزنة ، عندما يكون تيارا المجموعة الثنائية غير متزين ، ويمكن الحصول على تيارات المجموعة الثلاثية المتزنة ، عندما يكون تياراً المجموعة الثنائية متزين ، ويصنع كل تيار منهما زاوية ϕ مع الضغط المناظر ، وذلك برسم خطوط المتجهات على نط خطوط المتجهات في شكل (٤-٨) ، باعتبار أن $I_{2a} = I_{2b}$ وأن $\phi_{2a} = \phi_{2b}$.

هذا ويتضح من الشكل (٤-٨) أنه عندما يكون معامل القدرة الواحد الصحيح ، فإنه يمكن الحصول على قيمة كل من I_w ، I_v (الذين يكونان متساويين في هذه الحالة) بالرسم ، أو من المعادلة :

$$I_v = I_w = \sqrt{(I_1)^2 + \left(\frac{I'_1}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (٨-٤)$$

ويكون معامل القدرة في المرحلة u هو نفس معامل القدرة في المرحلة a ، أى أن $\phi_u = \phi_{2a}$ ، بينما تكون زاوية الاختلاف المرحلى في كل من w ، v هى $\phi_w = \phi_v = \left(30 - \tan^{-1} \frac{I_1}{2I'_1}\right)$ ، وتراعى الإشارة الناتجة لتعيين ما إذا كان التيار متأخراً أو متقدماً (متأخر عندما تكون الزاوية سالبة ، ومتقدم عندما تكون موجبة) .

بالرجوع إلى الشكل (٤-٨) نجد أن الزاوية المقابلة للتيار I_v ، في المثلث الذى يحويه ، هى $\theta_v = 90 - \phi_{2a} + \phi_{2b}$. بينما تكون الزاوية المقابلة

للتيار I_w ، في المثلث الذى يحتويه ، على نفس النقط السـابق ، هى
 $\theta_w = 90 - \phi_{2b} + \phi_{2a}$. بذلك يمكن الحصول على قيمة كل من هذين
 التيارين باعتباره ضلعاً في المثلث المعنى :

$$I_v = \sqrt{(I_1)^2 + \left(\frac{I'_1}{2}\right)^2 - I_1 I'_1 \cos \theta_v}$$

$$I_w = \sqrt{(I_1)^2 + \left(\frac{I'_1}{2}\right)^2 - I_1 I'_1 \cos \theta_w} \dots (٨-٥)$$

بالرجوع إلى شكل (٨-٤) يمكننا تعيين زاوية الاختلاف المرحلى ϕ_v
 بين التيار I_v والضغط المرحلى المناظر ، وكذلك زاوية الاختلاف المرحلى ϕ_w
 بين التيار I_w والضغط المرحلى المناظر ، حيث نجد أن :

$$\phi_v = 30 - \phi_{2b} - \alpha_v$$

ويمكن الحصول على قيمة α_v بدلالة التيارات التى حصلنا عليها ، وذلك
 باستخدام العلاقة بين أطوال وأضلاع المثلث وجيوب زواياه ، حيث :

$$\frac{I'_1}{2 \sin \alpha_v} = \frac{I_v}{\sin \theta_v} ;$$

$$\sin \alpha_v = \frac{I'_1}{2 I_v} \sin \theta_v$$

$$\alpha_v = \sin^{-1} \frac{I'_1}{2 I_v} \sin \theta_v \dots \dots \dots (٨-٦)$$

$$\phi_w = \alpha_w - (30 + \phi_{2b})$$

$$\frac{I'_1}{2 \sin \alpha_w} = \frac{I_w}{\sin \theta_w} ,$$

الذى يحتوى على الملفات T_1 اسم المحول الرئيسى (Main transformer) ،
 بينما يطلق على المحول الذى يحتوى على الملفات $T_1 \frac{\sqrt{3}}{2}$ اسم المحول المضائق
 (Teaser transformer) . ونلاحظ بناء على التحليلات السابقة أنه بينما
 يكون التيار واحداً فى المحولين ، فإن الضغط بالنسبة للمحول الرئيسى يكون
 أكبر من الضغط بالنسبة للمحول الآخر بحوالى % 15 ، مما يستدعى أن يكون
 مقنن قدرة المحول الرئيسى أكبر من مقنن قدرة المحول المضائق بما يساوى % 15
 أيضاً . ومن الممكن بطبيعة الحال استخدام محولين بنفس مقنن قدرة المحول
 الرئيسى ، كما سبقت الإشارة اليه من قبل .

مثال (١) :

A Scott — connected transformer is fed from a 6600 V
 2 phase network and supplies 3 phase power at
 500 V between lines on a 4 — wire system. If
 there are 500 turns per phase on the 2 — phase
 side, find the number of turns in the low — voltage
 winding, and the position of the tapping of the
 neutral wire. Show that if the load is balanced
 on one side it will also be balanced on the other
 side.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_L} = \frac{6600}{500} = 13.2$$

$$T_1 = \frac{500}{13.2} = 38$$

$$T'_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} T_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 38 = 33$$

$$\frac{T'_1}{3} = 11 \quad \text{عدد اللفات NP}$$

$$\frac{2T'_1}{3} = 22 \quad \text{عدد اللفات Nu}$$

يمكن الاجابة على الجزء النظري بالرجوع إلى شكل (٤ - ١٨) ، وما كتب

عنه .

مثال (٢) :

Two 1 - phase, Scott - connected transformers supply a 3 - phase, 4 - wire, 50 c/s distribution system with 250 V between lines and neutral. The high - voltage windings are connected to a 2 - phase system with a phas voltage of 11000 V. allowing a maximum flux density not exceeding 12000 lines per cm² in a gross core section of 550 cm², determine the number of turns in each section of the high - voltage and low - voltage windings, and the position of the neutral point.

المنطق الخطى في المجموعة الثلاثية :

$$V_L = \sqrt{3} \times 250 = 433 \text{ V}$$

منطق المجموعة الثنائية :

$$V_2 = 11000 \text{ V}$$

$$E_t \leq 4.44 \times 50 \times 12000 \times 550 \times 10^{-8} \leq 14.65$$

وهذه هي قيمة الضغط لكل لفة على الناحيتين ، وهي تساوى كلا من $\frac{V_L}{T_1}$ ،

وكذلك $\frac{V_2}{T_2}$. ويمكن أخذ قيم أصغر لـ E_t باعتبار قيم أصغر لكثافة الخطوط ،
التي اشترط ألا تزيد عن 12000 خط/سم^٢ ، وفي هذه الحالة يراعى اختيار عدد
اللفات T_1 على المحول الرئيسى ، بحيث تكون عددا صحيحا . وفي نفس الوقت
يجب أن تكون T'_1 أيضا عددا صحيحا يقبل القسمة على 3 ، حتى يمكن تحديد
النقطة N ، بحيث يكون عدد اللفات UN يساوى ضعف عدد اللفات NP ،
ويكون كل منها عددا صحيحا في نفس الوقت . وعلى هذا الأساس نستطيع
تحديد قيمة T_1 على النحو التالى :

$$T_1 \geq \frac{V_L}{E_t} \geq \frac{250 \times \sqrt{3}}{14.65} \geq 30$$

يمكننا أن نختار لـ T_1 أول أكبر قيمة بعد 30 ، بحيث يكون

$$T'_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} T_1$$

عددا صحيحا يقبل القسمة على 3 ، وهو العدد 30 . وفي

هذه الحالة تكون قيمة T_1 عبارة عن 35 ، أى أنه على حسب شكل (٣-٨) نجد أن :

$$T_1 = 35 , T'_1 = 30 , NP = 10 , NU = 20$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_L} = \frac{11000}{433} = 25.4$$

$$T_2 = 35 \times 25.4 = 888$$

لفة

مثال (٣) :

Two 1 — phase furnaces a and b are supplied at 80 V by means of a Scott — connected transformer combination from a 3 — phase, 6600 V system. The Voltage of furnace a is leading. Calculate the line currents on the 3 — phase side when the furnaces take 500 KW and 800 KW respectively (i) at unity power factor (ii) furnace a at unity p.f., furnace b at 0.7 p.f. lagging, and draw the corresponding vector diagrams.

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{6600}{80} = 82.5$$

التيار في الفرن a :

$$i) I_{2a} = \frac{500 \times 1000}{80} = 6250 \text{ A}$$

باستخدام المعادلة (٢-٨) نحصل على التيار في الخط المتصل بالطرف 'u' ،

وهو نفس التيار I'_1 المار في الملفات T'_1 :

$$I_u = I'_1 = 1.15 \times \frac{6250}{82.5} = 87.5 \text{ A}$$

التيار في الفرن b :

$$I_{2b} = \frac{800 \times 1000}{80} = 10000 \text{ A}$$

باستخدام المعادلة (٣-٨) نحصل على التيار I_1 المار في كل قسم من الملفات

$\frac{T_1}{2}$ مع التيار $\frac{I'_1}{2}$ ، حيث :

$$I_1 = \frac{10000}{82.5} = 121.1 \text{ A}$$

بالرجوع إلى الشكل (٤-٨) واستخدام المعادلة (٤-٨) نحصل على التيارين I_w ، I_v ، المتساويين في هذه الحالة ، نظراً لوجود تماثل ، حيث :

$$I_w = I_v = \sqrt{(I_1)^2 + \left(\frac{I'_1}{2}\right)^2}$$

$$= \sqrt{(121.1)^2 + (43.75)^2} = 129 \text{ A}$$

$$\text{ii) } I_{2a} = 6250 \text{ A} , \quad I_u = I'_1 = 87.5 \text{ A}$$

إذ لم يتغير شيء بالنسبة للفرن a

التيار في الفرن b :

$$I_{2b} = \frac{800 \times 1000}{0.7 \times 80} = 14300 \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{14300}{82.5} = 173.2 \text{ A}$$

باستخدام الشكل (٤-٨ب) نحصل على التيارين I_w ، I_v ، وهما غير متساويين في هذه الحالة . ويراعى أن ϕ_{2a} تساوى صفراً ، وأن $\phi_{2b} = \cos^{-1} 0.7$. نحصل على قيمة كل من التيارين من الشكل المرسوم على هذا النحو ، حيث :

$$I_v = 207 \text{ A} , \quad I_w = 145 \text{ A}$$

كذلك يمكن أن نحصل على قيمة كل من I_v ، I_w باستخدام المعادلة (٤-٨)

حيث :

$$\phi_{2a} = 0 \quad , \quad \phi_{2b} = \cos^{-1} 0.7 = 45.5^\circ$$

$$\theta_v = 90 + 45.5 = 135.6^\circ \quad , \quad \cos \theta_v = -0.713$$

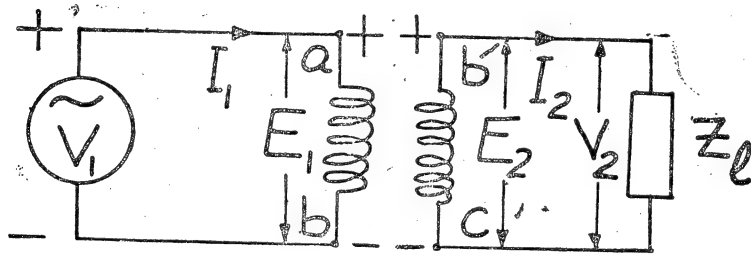
$$\theta_w = 90 - 45.5 = 44.5^\circ \quad , \quad \cos \theta_w = 0.713$$

$$I_v = \sqrt{3 \times 10^4 + 0.187 \times 10^4 + 1.082 \times 10^4} = 207 \text{ A}$$

$$I_w = \sqrt{3 \times 10^4 + 0.187 \times 10^4 - 1.082 \times 10^4} = 145 \text{ A}$$

(The auto — transformer) : المحول الذاتي :

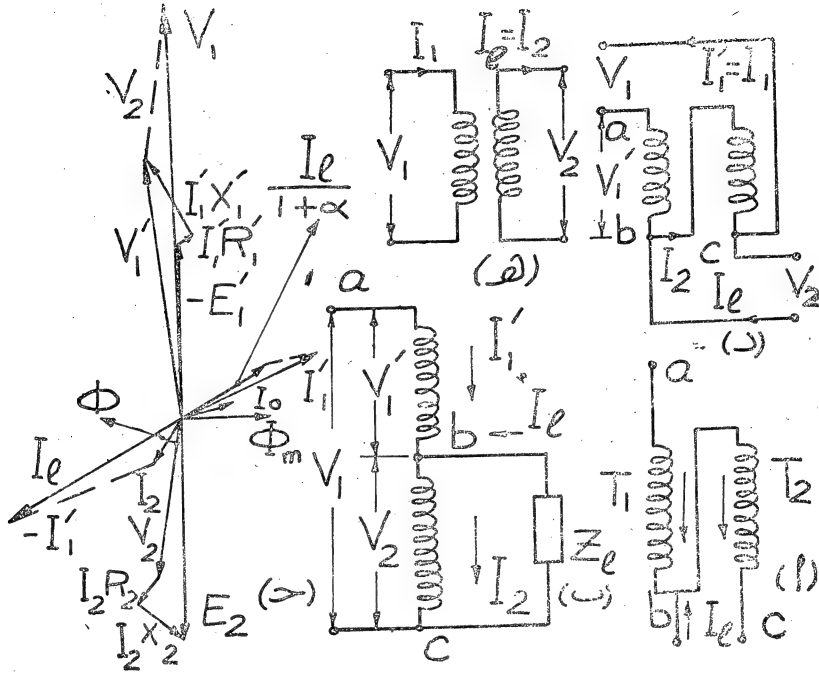
يبين شكل (٨-٥) الدائرتين ، الابتدائية والثانوية ، لمحول مفرد المرحلة مع تعيين قطبية الأطراف المختلفة للملفين ، الابتدائي والثانوي ، عند لحظة معينة واتجاهي التيارين I_1 ، I_2 ، بناء على ذلك . ويكون تيار الحمل هو نفس تيار



شكل (٨-٥)

الملف الثانوي I_2 . إذا وصل الطرفان b ، b' نحصل على ما يسمى بالمحول الذاتي كما هو مبين في شكل (٨-٦) ، الذي يوضح الاتجاهات الموجبة للتيارات ، على هدى ما جاء في شكل (٨-٥) . ويبين شكل (٨-٦) الدائرة الكهربائية لمثل هذا المحول ، مع وجود معاوقة الحمل Z_l .

إذا رمزنا لحدود الملف الابتدائي ، في حالة التوصيل كمحول ذاتي ، بنفس الرموز الأصلية مع شرطة فوق الرمز ، أي T_1 ، I_1 ، E_1 ... إلخ ، يمكننا



شكل (٦-٨)

أن نستخلص النتائج الآتية ، بالنسبة للمحول الجديد ، مستفيدين في خلال ذلك من معلوماتنا عن الحالة الأصلية :

١ - نظراً لوجود نفس العلاقة بين القوتين المدافعتين الكهربيتين في الملمين T_1 ، T_2 ، لتشابكهما مع نفس الفيض المتبادل بينهما ، كما كان الأمر من قبل ،

$$\alpha = \frac{E'_1}{E_2} = \frac{T'_1}{T_2}$$

٢ - عند تحميل المحول يجب أن يبقى الفيض المتبادل بدون تغيير ، وهذا يستدعي أن يكون المجموع الاتجاهي (vector addition) للامبير لفات التي يعطيها كل من الملمين ، الابتدائي والثانوي ، في هذه الحالة ، مساوياً لمتجه الامبير

لغات التي نحصل عليها من الملف الابتدائي بدون حمل ، كما سبق شرحه بالنسبة
للمحول العادي ، بالإشارة إلى شكل (٨-٧) . لذلك نجد أن :

$$T_1 \dot{I}'_1 + T_2 \dot{I}_2 = (T_1 + T_2) \dot{I}_0$$

$$\therefore \dot{I}_2 = (1 + \alpha) \dot{I}_0 - \alpha \dot{I}'_1 \dots\dots\dots (٨-٩)$$

وبتطبيق قانون كيرشوف الثاني عند النقطة b في شكل (٨-٦) نجد أن :

$$\dot{I}_2 = \dot{I}'_1 + \dot{I}_l \dots\dots\dots (٨-١٠)$$

نحصل من المعادلتين (٨-٩) ، (٨-١٠) على \dot{I}'_1 بدلالة \dot{I}_l :

$$\dot{I}'_1 + \dot{I}_l = (1 + \alpha) \dot{I}_0 - \alpha \dot{I}_l$$

$$\therefore \dot{I}'_1 = \dot{I}_0 - \frac{\dot{I}_l}{(1 + \alpha)} \dots\dots\dots (٨-١١)$$

٣ - بتطبيق قانون كيرشوف الأول على الدوائر المختلفة في شكل (٦-١

٨) ، نحصل على النتائج الآتية :

$$\dot{V}'_1 = - \dot{E}_1 + \dot{I}'_1 \dot{Z}_1 = - \dot{E}'_1 + \dot{I}'_1 (R'_1 + jX'_1)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \dot{Z}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) \dots\dots (١٨-١٢)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{V}'_1 - \dot{V}_2 = - (\dot{E}'_1 + \dot{E}_2) + \dot{I}'_1 \dot{Z}_1 + \dot{I}_2 \dot{Z}_2$$

$$= (1 + \alpha) \dot{E}_2 + \dot{I}'_1 \dot{Z}_1 + \dot{I}_2 \dot{Z}_2 \dots\dots\dots (٨-١٢)$$

يبين شكل (٦-٨) مخطط المتجهات للمحول الذاتي ، وهو محمل ، مرسوماً على أساس المعادلات (٨-١٠) ، (٨-١١) ، (٨-١٢) . هذا ويجب ، كما سبق أن نعلمنا في مواضع سابقة ، التفرقة بين هبوط الضغط ، ومركبة ضغط الينبوع اللازمة لمعادلة هذا الهبوط ، اللذين يكونان في اتجاهين متضادين ، عند رسم مخطط المتجهات ، وعند تطبيق قانون كيرشوف الأول . لذلك نألف النظر في هذا المضمار إلى أنه ، بينما يمثل V_2 متجه الضغط فعلاً في شكل (٦-٨) ، فإن V_1 تمثل مركبة ضغط الينبوع اللازمة بين النقطتين a و b لتزوير التيار I_1 . وقد أدى ذلك إلى استخدام \vec{V}_2 بإشارة سالبة في المعادلة (٨-١٢) ، التي تطبق قانون كيرشوف على أساس متجهى مركبتى ضغط الينبوع ، لا على أساس متجه هبوط الضغط الفعلى والقوة الدافعة الكهربائية المضادة .

بناءً على ما سبق كله يكون \vec{V}_1 هو متجه ضغط الينبوع ، اللازم توصيله بين النقطتين a ، c ، للحصول على تيار الحمل I_1 ، في معاوقة الحمل Z_1 الموصلة بين الطرفين b ، c ، في المحول الذاتي ، بالعلاقات المعطاه ، وكما هو مبين في شكل (٦-٨) ، حيث نجد أن : (أ) V_2 هو الضغط اللازم على طرفي الحمل و I_2 هو تيار الحمل المناظر ، الذى يصنع مع هذا الضغط زاوية الاختلاف المرحلى ϕ ، التى تتوقف على طبيعة الحمل . (ب) E_2 هى القوة الدافعة الكهربائية اللازم وجودها بين الطرفين b ، c على هذا الأساس ، وهى متخلفة عن الفيض المغناطيسى المتبادل ϕ_m بزاوية مقدارها 90 درجة كهربية . (ج) الفيض المغناطيسى ϕ_m فى اتفاق مرحلى مع تيار التغطس I_{m0} ، الذى هو عبارة عن المركبة الأفقية لتيار الاحمل I_0 . (د) E_1 هى القوة الدافعة الكهربائية التى يولدها نفس هذا الفيض ϕ_m بين الطرفين b ، a ، وهى فى توافق مرحلى مع E_2 .

(هـ) V_1' هي مركبة ضغط الينبوع اللازمة لمعادلة القوة الدافعة الكهربائية E_1' مع هبوط الضغط في الملفات T_1' على أساس مرور التيار I_1' فيها . (و) I_1' هو التيار اللازم خروجه من الينبوع لإعطاء مركبة التيار I_0 في الملفات T_1' ، وكذلك لمعادلة التأثير المغناطيسي للتيار I_2 ، بإعطاء مركبة التيار $I_1' = \frac{I_1}{1 + \alpha}$ في نفس هذه الملفات .

الوفر في نحاس المحول الذاتي :

(Economy in auto — transformer copper)

باعتبار أن I_0 تيار صغير يمكن إهماله ، كما هو معروف بالنسبة للمحول المعتاد ، فإن وجود الإشارة السالبة في المعادلة (١١ - ٨) تعنى أن التيارين I_1 و I_2 متضادان تقريبا في الاتجاه . وهذا يعنى بالتالى أن قيمة التيار I_2 صغيرة ، بالنسبة لقيمة كل من I_1 ، I_2 ، وتسارى الفرق بينها تقريبا ، كما هو واضح في شكل (٦ - ٨) . كذلك نظرا لأن α موجبة ، فإن المعادلة (١١ - ٨) تشير أيضا ، مع إهمال I_0 ، إلى أن قيمة I_2 أكبر من قيمة I_1 .

يبين شكلا (د) و (هـ) محولين ، أحدهما تقليدى (هـ) والآخر ذاتى (د) ، يقومان بأداء نفس المهمة بالضبط ، بمعنى أن كلا منهما موصل إلى الينبوع ، الذى ضغطه V_1 ويعطى التيار I_1 ، عندما يكون تيار الحمل I_L ، والضغط على طرفي الملف الثانوى V_2 بحيث يمر فيه التيار I_2 . هذا وبينما يحتوى المحول التقليدى في (هـ) على T_1 من اللفات في الملف الابتدائى ، T_2 من اللفات في الملف الثانوى ، نجد أن المحول الذاتى في (د) يحتوى على T_1 من اللفات بين a ، c ، بحيث يكون عدد اللفات من a إلى b هو T_1' ، ومن b إلى c هو $(T_1 - T_1') = T_2$ ،

حتى تتحقق العلاقات بين الضغوط في المحول الذاتي على النحو المطلوب . وفي هذه الحالة يمكننا أن نعتبر ، على وجه التقريب ، أن :

$$V_1 : V'_1 : V_2 = (E'_1 + E_2) : E'_1 : E_2 = T_1 : T'_1 : T_2 \quad (A-13)$$

كما يمكننا بالنسبة للتيارات والأمبير لفات الناشئة عنها أن نعتبر ، على وجه التقريب أيضا ، أن :

$$I_1 T_1 = I_2 T_2 = I_l T_2 \text{ ، } I_1 (T_1 - T_2) = (I_l - I_1) T_2 \dots (A-14)$$

حيث $I_1 T_1$ هي الأمبير لفات الملف الابتدائي ، و $I_2 T_2$ هي الأمبير لفات الملف الثانوي ، في حالة المحول التقليدي ، كما أن $I'_1 T'_1 = I_1 (T_1 - T_2)$ هي أمبير لفات الملف الابتدائي و $I_2 T_2 = (I_l - I_1) T_2$ هي أمبير لفات الملف الثانوي ، في حالة المحول الذاتي . فإذا اعتبرنا أن طول سلك النحاس المستخدم في الملف يتناسب مع عدد لفاته (باعتبار أن الطول المتوسط للفة واحد في جميع الأحوال) ، واعتبرنا مساحة مقطع هذا السلك يتناسب مع قيمة التيار المار فيه (باعتبار أن كثافة التيار واحدة في جميع الملفات) ، نجد أن وزن النحاس ، المستخدم في أي ملف من هذه الملفات جميعها ، يتناسب مع قيمة الأمبير لفات لكل منها ، وبذلك تكون نسبة وزن النحاس المستخدم في المحول الذاتي W'_{cu} ، إلى وزن النحاس المستخدم في المحول التقليدي W_{cu} ، الذي يؤدي نفس المهمة ، هي β ، حيث :

$$\begin{aligned} \beta = \frac{W'_{cu}}{W_{cu}} &= \frac{I_1 (T_1 - T_2) + (I_l - I_1) T_2}{I_1 T_1 + I_2 T_2} \\ &= \frac{2(I_l - I_1) T_2}{2I_l T_2} \end{aligned}$$

$$\beta = 1 - \frac{I_1}{I_2} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$= \frac{T'_1}{T_1} \dots\dots\dots (٨-١٥)$$

عندما تصبح قيمة T'_1 تساوى صفرا ، فإن النقطة b ، فى شكل (٦-٨) تنطبق على النقطة a ، وهذا يعنى أننا أصبحنا فى غير حاجة إلى استخدام المحول كما يفسر معنى أن تكون قيمة β تساوى الصفر ، كما تعطى المعادلة (١٥-٨) ، فى هذه الحالة . كذلك يقل وزن النحاس المستعمل فى المحول الداخلى ، بالنسبة لوزنه فى المحول التقليدى ، الذى يؤدى نفس الغرض ، كما تشير إليه نفس هذه المعادلة ، كلما زادت النسبة $\frac{T_2}{T_1}$ ، بحيث نحصل على قيمة β تساوى صفرا ، مرة أخرى بنفس المعنى السابق ، عندما تصبح T_2 مساوية T_1 ، وهو ما يعنى أن T'_1 تساوى صفرا أيضا .

عندما يصبح $2V_2$ $\approx V_1$ ، أى أن $\frac{T_2}{T_1} \approx \frac{1}{2}$ ، فإن الوفرة الناتجة فى وزن النحاس يساوى % 50 تقريبا ، على مدى ماسبق شرحه ، وهذا يؤدى إلى وفرة فى الثمن الكلى للمحول يتراوح بين % 30 و % 35 . هذا ولا مجال لمناقشة ما يحدث لقيمة الوفرة فى ثمن المحول إذا قلت النسبة $\frac{T_2}{T_1}$ عن ذلك كثيرا ، لأن هذه النسبة لا يمكن أن تقل عن 0.35 ، بسبب اعتبارات فنية كثيرة تارم مراعاتها عند تصميم المحولات الذاتية .

قد يكون من المفيد أن ن عقد الآن المقارنة بين محولين ، أحدهما تقليدى والآخر ذاتى ، ونستخدم فيهما نفس الوزن من النحاس فى الملفات . وهذا يعنى بمقتهى البساطة أن نأخذ محولا تقليديا ، فنصل الملف الابتدائى والملف الثانوى

على التوالي معا ، كما سبق الإشارة اليه في شكل (٦-٨) ، لكي نكون محولا ذاتيا ، ونقارنه بعد ذلك بالحالة الأصلية نجد في هذه الحالة أننا نحتاج إلى ينبوع ضغطه $V_1 + V_2$ يوصل بين a ، c ، لكي نحصل على الضغط V_2 بين b ، c ، باعتبار أن V_1 هو ضغط الينبوع ، اللازم توصيله على الملف الابتدائي في المحول التقليدي ، للحصول على الضغط V_2 على طرفي الملف الثانوي . هذا ويلاحظ أننا نستطيع تحميل المحول الذاتي في هذه الحالة إلى الحد الذي يؤدي إلى مرور التيار I_1 في جزء الملفات ab ، والتيار I_2 في جزء الملفات bc ، وهما تيارا الحل الكامل في ملفي المحول التقليدي . يبين الجدول على صفحتي ٤١٤ ، ٤١٥ أوجه المقارنة بين المحولين في النواحي المختلفة على هذا الأساس ، حيث $\alpha = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$

الدائرة المكافئة للمحول الذاتي :

(Equivalent circuit of the auto - transformer)

إذا كانت Z_o هي معاوقة النمطس للمحول الذاتي ، فأننا نستطيع الحصول على المعادلة التي تربط بين \dot{V}_1 و \dot{I}_1 ، وهي التي نحدد ثوابت الدائرة المكافئة للمحول على أساسها ، مع مراعاة جميع الحقائق السابقة ، وذلك على النحو التالي :

$$\dot{V}_2 = \dot{I}_1 Z_l$$

$$\dot{I}_o = \frac{-(\dot{E}_1 + \dot{E}_2)}{\dot{Z}_o} = -\frac{(1 + \alpha) \dot{E}_2}{\dot{Z}_o} \dots (A-16)$$

بالتعويض من المعادلة (١٦-٨) في المعادلة (١٢-٨) نجد أن :

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_o \dot{Z}_o + \dot{I}'_1 \dot{Z}'_1 + \dot{I}_2 \dot{Z}_2 \dots (A-17)$$

الذاتي نسبة : التقليدي	في المحول الذاتي	في المحول التقليدي	حدود المقارنة
1	P_{Fe}	P_{Fe}	منقودات الحديد
1	$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$	$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$	منقودات النحاس
1	$R_{1eq} = R_1 + a^2 R_2$	$R_{1eq} = R_1 + a^2 R_2$	للمقاومة المكافئة
1	$X_{1eq} = X_1 + a^2 X_2$	$X_{1eq} = X_1 + a^2 X_2$	للمفاعلة المكافئة
$\frac{a}{1+a}$	$\frac{I_1 R_{1eq} \cos \phi + I_1 X_{1eq} \sin \phi}{V_1 + V_2}$	$\frac{I_1 R_{1eq} \cos \phi + I_1 X_{1eq} \sin \phi}{V_1}$	معامل التنظي عند $\cos \phi$
أكبر من واحد	$\frac{V_2 I_1}{V_2 I_1 + P_{cu} + P_{Fe}}$	$\frac{V_2 I_2}{V_2 I_2 + P_{cu} + P_{Fe}}$	معامل الجودة عند معامل قدرة الى حددة

الذاتي نسبة : التقليدي	في المحول الذاتي	في المحول التقليدي	حدود المقارنة
$\frac{1 + \alpha}{\alpha}$	$1 + \alpha \underline{\underline{=}} \frac{V_1 + V_2}{V_2}$	$\alpha \underline{\underline{=}} \frac{V_1}{V_2}$	نسبة تحويل الضغط من التبروع
1	I_1	I_1	تيار المدخل
$\frac{1 + \alpha}{\alpha}$	$P_1 = (V_1 + V_2) I_1$	$P_1 = V_1 I_1$	قدرة المدخل عند معامل قدرة الوحدة
$\frac{1 + \alpha}{\alpha}$	$I_1 \underline{\underline{=}} I_2 + I_1$	$I_1 = I_2$	تيار المخرج
$\frac{1 + \alpha}{\alpha}$	$P_2 = V_2 I_1$	$P_2 = V_2 I_2$	قدرة المخرج عند معامل قدرة الوحدة

وبالتعويض في المعادلة (٨-١٧) عن \dot{I}_2 من المعادلة (٨-٩) :

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_0 [\dot{Z}_0 + (1 + \alpha) \dot{Z}_2] + \dot{I}'_1 (\dot{Z}'_1 - \alpha \dot{Z}_2) \quad (٨-١٨)$$

بالتعويض عن $\dot{V}_2 = \dot{I}_l \dot{Z}_l$ في المعادلة (٨-١١) ينتج أن :

$$\dot{V}_2 = \dot{I}_l \dot{Z}_l = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \dot{Z}_2$$

بالتعويض عن \dot{I}_l في هذه المعادلة ، من المعادلة (٨-١٠) ، وعن \dot{E}_2 من المعادلة (٨-١٦) نجد أن :

$$(\dot{I}_2 - \dot{I}'_1) \dot{Z}_l = - \frac{\dot{I}_0 \dot{Z}_0}{(1 + \alpha)} - \dot{I}_2 \dot{Z}_2$$

$$\therefore \dot{I}_2 (\dot{Z}_2 + \dot{Z}_l) = \dot{I}'_1 \dot{Z}_l - \frac{\dot{I}_0 \dot{Z}_0}{(1 + \alpha)} \quad \dots \quad (٨-١٩)$$

بالتعويض في المعادلة (٨-١٩) عن \dot{I}_2 من المعادلة (٨-٩) :

$$\therefore [(1 + \alpha) \dot{I}_0 - \alpha \dot{I}'_1] (\dot{Z}_2 + \dot{Z}_l) = \dot{I}'_1 \dot{Z}_l - \frac{\dot{I}_0 \dot{Z}_0}{(1 + \alpha)}$$

$$\begin{aligned} \therefore \dot{I}_0 \left[\frac{\dot{Z}_0}{(1 + \alpha)} + (1 + \alpha) \dot{Z}_l + (1 + \alpha) \dot{Z}_2 \right] \\ = \dot{I}'_1 [\dot{Z}_l (1 + \alpha) + \alpha \dot{Z}_2] \quad \dots \dots \quad (٨-٢٠) \end{aligned}$$

بالتعويض عن قيمة \dot{I}_0 بدلالة \dot{I}'_1 في المعادلة (٨-١٨) من المعادلة (٨-٢٠) نجد أن :

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_1 \left\{ \dot{Z}'_1 - \alpha \dot{Z}_2 + \frac{[\dot{Z}_0 + (1 + \alpha) \dot{Z}_2][\dot{Z}_l(1 + \alpha) + \alpha \dot{Z}_2]}{\frac{\dot{Z}_0}{(1 + \alpha)} + (1 + \alpha) \dot{Z}_l + (1 + \alpha) \dot{Z}_2} \right\} \quad (٨-٢١)$$

يمثل الحد المضروب في \dot{I}_1 ، لكي يعطى الضغط \dot{V}_1 ، في المعادلة (٨-٢١) للمعاوقة المكافئة للدحول الذاتي Z_{eq} ، التي يمكن كتابتها على النحو التالي :

$$Z_{eq} = (\dot{Z}'_1 - \alpha \dot{Z}_2) + \frac{1}{\frac{1}{\dot{Z}_0 + (1 + \alpha) \dot{Z}_2} + \frac{1}{(1 + \alpha)^2 \dot{Z}_l + \alpha (1 + \alpha) \dot{Z}_2}} \quad (٨-٢٢)$$

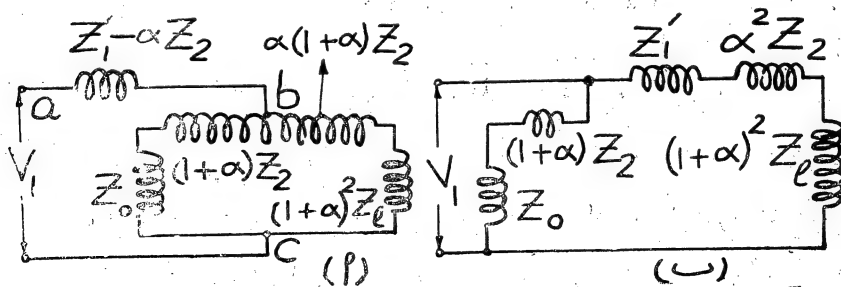
توضح كل من المعادلتين (٨-٢١) ، (٨-٢٢) أن المعاوقة المكافئة للدحول

الذاتي Z_{eq} تتكون من المعاوقة $(\dot{Z}'_1 - \alpha \dot{Z}_2)$ ، التي تتصل على التوالي مع

معاوقتين متصلتين معا على التوازي ، وهما $\dot{Z}_0 + (1 + \alpha) \dot{Z}_2$ والمعاوقة

$(1 + \alpha)^2 \dot{Z}_l + \alpha (1 + \alpha) \dot{Z}_2$ ، وذلك كما هو مبين في شكل (٨-٨) .

فاذا راعينا أن معاوقة التمهطس أو التنبية (exciting impedance) تكون



شكل (٨-٧)

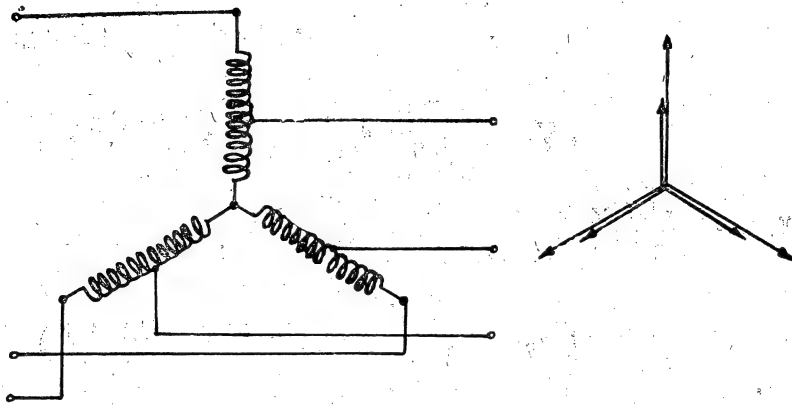
كبيرة جداً بالنسبة لكل من المعاوقات Z_1 , Z_2 , Z_1' ، فإننا نستطيع تبسيط الدائرة بنقل المعاوقة $(1 + \alpha Z_2) + Z_0$ بحيث تصبح موصلة على الينبوع مباشرة كما فعلنا في الدائرة المكافئة للمحول التقليدي ، فنحصل على دائرة مكافئة تقريبية ، تفى بالفرض بالنسبة لإحتياجاتنا ، كما هو مبين في شكل (٧ - ٨) .

لإستخدام الدائرة المكافئة التقريبية ، المبينة في شكل (٧ - ٨) ، في الحسابات الخاصة بالمحول الذاتي ، مثل حساب معامل التنظيم وحساب معامل الجودة ، يمكننا أن نستفيد من القوانين التي استنبطناها على أساس الدائرة المكافئة للمحول التقليدي ، منسوبة إلى الملف الابتدائي ، مع مراعاة أن نقل المقاومة وعمانعة التسرب في الملفات T_2 إلى ناحية الينبوع يكون باستعمال النسبة $\alpha = \frac{T_1}{T_2}$ ، بينما تكون تحويلات الضغط والتيار ، وبالتالي معاوقة الحمل Z_L ، من ناحية الحمل إلى ناحية الينبوع ، باستعمال النسبة $\frac{T_1}{T_2} = (1 + \alpha)$ ، أو معكوسها . أما بالنسبة لتيار اللاحمل I_0 ، ومركبتيه I_{0a} ، I_{0u} فإننا نستخدم المعاوقة $Z_0 + (1 + \alpha) Z_2$ ، بدلا من Z_0 فقط في حالة المحول التقليدي .

المحولات الذاتية ثلاثية المراحل :

(3 - phase auto — transformers)

يمكننا الحصول على محول ذاتي ثلاثي المراحل ، باستخدام نقط تقسيم على الملفات الابتدائية في المحول التقليدي ، بنفس الطريقة ، بالنسبة للمراحل الثلاث ، التي اتبعت بالنسبة للملف الابتدائي ، في حالة المحول مفرد المرحلة . يبين شكل (٨ - أ) ملفات محول ثلاثي المراحل موصل نجمة ، كما يبين شكل



شكل (٨ - ٨)

(٨ - ٨) ضغوط المراحل الثلاث ، في هذه الحالة . وأغلب هذه المحولات توصل نجمة ، وتستخدم في بعض الأغراض الخاصة ، مثل بدء المحركات التآهيرية ، كما سوف يأتي ذكره فيما بعد . هذا وعند حساب مثل هذه المحولات تتبع جميع القوانين والقواعد التي تم استنباطها بالنسبة للمرحلة الواحدة ، مع مراعاة قيم الضغط المرحلي والتيار المرحلي والقدرة المرحلية ، في حالة المحول ثلاثى المراحل .

مثال (١) :

Find the values of the currents flowing in the various branches of a 3 — phase, star — connected auto — transformer loaded with 500 KW at 0.8 power factor lagging and having a ratio of 440/500 V Neglect voltage drops and all losses in the transformer, also the magnetising current

بالرجوع إلى الرموز المبينة في شكل (٦ - ٨) ، وبالنسبة للتيارات

والضغوط المرحلية ، نجد أن :

$$(V_1 = \frac{500}{\sqrt{3}} \text{ ناحية التيار الخطى أو المرحلى ناحية})$$

$$I_1 = \frac{500 \times 1000}{\sqrt{3} \times 500 \times 0.8} = 722 \text{ A}$$

$$(V_2 = \frac{440}{\sqrt{3}} \text{ ناحية التيار الخطى أو المرحلى ناحية})$$

$$I_2 = \frac{500 \times 1000}{\sqrt{3} \times 440 \times 0.8} = 820 \text{ A}$$

التيار I'_1 في جزء الملفات T'_1 هو نفس التيار I_1 ، حيث $I'_1 = 722 \text{ A}$
أما التيار I_2 في جزء الملفات T_2 ، فهو يساوى الفرق بين I_1 و I_2 تقريبا ، كما
سبق ذكره ، حيث :

$$I_2 \approx I_1 - I_2 \approx 820 - 722 = 98 \text{ A}$$

مثال (٢) :

A10KVA, 2300/230 V transformer, tested on open circuit, takes 1.09 A and 100 W when supplied at 230 V. With the low voltage coil short — circuited, 79.5 V applied to the high — voltage winding produces a current of 5.0 A, and the power consumed is 196 W. The primary and secondary windings are each wound in two equal sections, the low voltage coils being in series for 230 V operation. It is desired to reconnect as an autotransformer to raise 2300 V to 2415 V and to deliver the maximum amount of power without

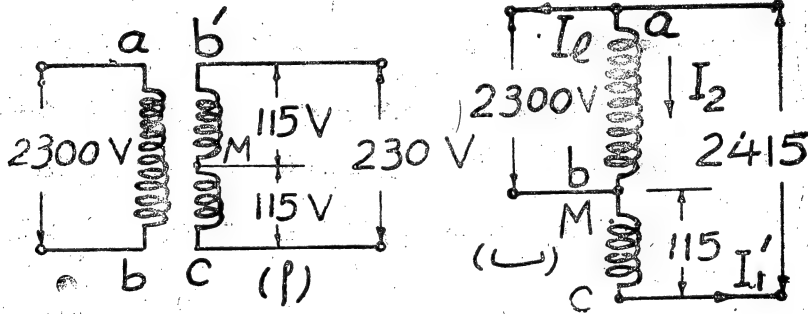
overheating. What will be the efficiency and KVA rating under this condition ?

نعين أولاً بعض الحدود الخاصة بالمحول التقليدي :

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2300}{230} = 10$$

$$I_1 = \frac{10 \times 1000}{2300} = 4.35 \text{ A} , \quad I_2 = 43.5 \text{ A}$$

$$P_{Fe} \approx 100 \text{ W} \quad (\text{مفقودات الحديد})$$



شكل (٩-٨)

يبين شكل (٩-٨) المحول التقليدي المعطى ، بينما يبين شكل (٩-٨) المحول الذاتي باعتبار ناحية للضغط العالي هي الملف الابتدائي ، وناحية التنبوع هي الملف الثانوي، حتى تتماشى الرموز المستخدمة مع ما جاء في شكل (٦-٨). هذا ونستطيع إعادة التوصيل كمحول ذاتي لرفع الضغط من 2300 V إلى 2415 V بتوصيل b مع M ، فنحصل على 2415 V بين a ، c ، عند توصيل ينبوع ضغطه 2300 V بين a ، b وتكون أقصى قيمة للتيار الذي تتحمله

الملفات بين M ، c هي $I_1' = 43.5 \text{ A}$ ، بينما لا تتحمل الملفات بين a ، b أكثر من $I_2 = 4.35 \text{ A}$ ، بما يجعلنا نستطيع الحصول على أقصى قيمة للتيار من السبوع $I_1' + I_2 \approx 47.85 \text{ A}$. نجد في هذه الحالة أن :

$$KVA_1 = 47.85 \times 2300 \times 10^{-3} = 11$$

$$KVA_1 = 43.5 \times 2415 \times 10^{-3} = 10.5$$

وعلى هذا الأساس نستطيع أن نعتبر أن أكبر قدرة مخرج للمحول لا يجب أن تزيد عن 10.5 KVA ناحية الضغط 2415 V . فإذا أردنا الحصول على معامل الجودة المناظر ، مع إعتبار أن معامل القدرة الوحدة ، نستطيع أن نفترض أن المفقودات الحديدية تظل كما هي وتساوي 100 W ، بينما تنخفض قيمة مفقودات النحاس بمقدار الربع ، لاستخدامنا نصف الملف الثانوى فقط ، وذلك باعتبار أن مفقودات النحاس موزعة بالتساوى بين الملفين الابتدائى والثانوى في المحول التقليدى ، أى أن $P_{cu} = 147 \text{ W}$ تقريباً . لذلك نجد أن :

معامل الجودة :

$$\eta = \frac{10.5}{10.5 + 0.1 + 0.147} = 0.977$$

(Tertiary winding) : الملف الثالث :

قد يزود المحول ، في حالات معينة ، بملف ثالث ، علاوة على الملفين الابتدائى والثانوى ، وذلك لإستخدامه في الأغراض الآتية :

- ١ — تغذية حمل مستقل يراد عزله عن الملف الثانوى .
- ٢ — توصيل المكثفات ، التى تستخدم بقصد تحسين معامل القدرة ، على

هذا الملف ، وذلك عندما يكون كل من الضغط الابتدائي ، والضغط الثانوى ، غير مناسب لتغذية هذه المكثفات . أو عندما يراد توصيل المكثفات على نحو يختلف عن طريقة توصيل الملفات ، كأن يكون هذا التوصيل نجمة ، وينبغي توصيل المكثفات دلثا مثلاً .

٣ — فى المحولات ثلاثية المراحل ، الموصلة نجمة/نجمة ، للتكفل بالتوافقية الثالثة فى تيار مغطسة المحول ، والأحمال غير المتوازنة ، ثم التحكم فى تيارات القصر ، التى قد تنشأ لآى سبب من الأسباب .

ويكون توصيل الملفات الثالثة ، فى المحولات ثلاثية المراحل ، على شكل دلثا عادة . فإذا حدث أى خطأ تنجم عنه دائرة قصر فى الملفات الابتدائية أو الثانوية للمحول ، (وخاصة عند اتصال الخطوط بالأرض) ، فقد ينشأ اختلال ملحوظ فى توازن الضغوط المرحلية ، مما يتسبب فى مرور تيارات عملية كبيرة فى الملفات الثالثة . وهذا يستدعى لإعداد هذه الملفات بممانعات تسرب كبيرة ، بحيث يمكن أن تحد من قيمة التيارات التى تمر ، فى مثل هذه الأحوال ، حتى لا تتسبب فى زيادة تسخين الملفات إلى حد الخطورة .

التيار الابتدائى فى محول يحتوى على ملف ثالث :

من الواضح أننا نستطيع الحصول على التيار الابتدائى ، فى هذه الحالة ، بجمع متجهات الأمبير لفات المغطسة مع كل من أمبير لفات الملف الثانوى وأمبير لفات الملف الثالث ، أو بجمع التيارات الثلاثة المتناظرة ، على أن تكون جميعها منسوبة للملف الابتدائى . فيما يلى مثال يوضح ذلك :

مثال :

A 3300/200/110 V, star/star/delta, 3 — phase transformer has a magnetising current of 8.7 A, and balanced 3 — phase loads of 800 KVA at 0.8 lagging on the secondary and 180 KVA at 0.6 leading on the tertiary. Find the primary current and power factor.

باعتبار التيارات جميعها منسوبة للملف الابتدائي ، وأخذ الضغط الابتدائي كمحور مرجعي ، وفرض أن التيار الثانوي I'_2 ، و التيار الملف الثالث I'_3 ، نجد أن :

$$\dot{I}_0 = -j 8.7$$

$$\begin{aligned} -\dot{I}'_2 &= \frac{800 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3300} \angle -\cos^{-1} 0.8 \\ &= 140 \angle -36.9^\circ = 112 - j 84 \text{ A} \end{aligned}$$

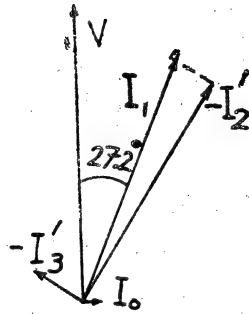
$$\begin{aligned} -\dot{I}'_3 &= \frac{180 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3300} \angle \cos^{-1} 0.6 \\ &= 31.5 \angle 53.1^\circ = 18.9 + j 25.2 \end{aligned}$$

بجمع هذه التيارات ، كما هو مبين في شكل (٩ - ٨) ، نحصل على التيار

الابتدائي I_1 .

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= -\dot{I}'_2 - \dot{I}'_3 + \dot{I}_0 = -j 8.7 + 112 - j 84 \\ &\quad + 18.9 + j 25.2 \end{aligned}$$

$$\dot{I}_1 = 130.9 - j 67.2 = 147 \angle -27.2^\circ$$



شكل (٩-٨)

باعتبار الكيلو فولت أمبير في الملف الابتدائي Q_1 ، والقدرة بالكيلووات KW_1 في هذا الملف و KW_2 في الملف الثانوي و KW_3 في الملف الثالث ، يجب أن يكون KW_1 مساويا لمجموع KW_2 و KW_3 ، وهذه طريقة للمراجعة على صحة النتائج التي حصلنا عليها .

$$Q_1 = \sqrt{3} \times 3300 \times 147 \times 10^{-3} = 842 \text{ KVA}$$

$$KW_1 = 842 \cos 27.2 = 748$$

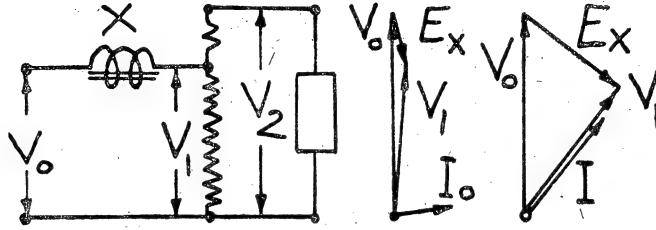
$$KW_2 = 800 \times 0.8 = 640 \quad , \quad KW_3 = 180 \times 0.6 = 108$$

$$KW_2 + KW_3 = 640 + 108 = 748 = KW_1$$

تنظيم الضغط باستخدام المحولات :

(Voltage control using transformers)

تستخدم المحولات ، في بعض الاحيان ، في تنظيم الضغط في حدود ضيقة ، وذلك علاوة على عملها الرئيسي في تحويل الضغط . وأبسط طريقة لذلك تكون باستخدام ممانعة X ، موصلة على التوالي مع الينبوع ، كما هو مبين في شكل (١٠-٨) . ويكون هبوط للضغط في الممانعة ، في هذه الحالة ، هو العامل الذي



شكل (٨-١٠)

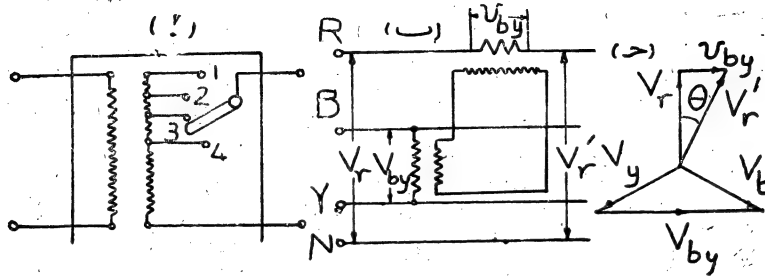
يتوقف عليه تغيير الضغط V_1 ، وبالتالي ضغط المخرج V_2 . ويستخدم في هذه الطريقة عادة محول ذاتي مع الممانع X ، ويتوقف مقدار تنظيم الضغط على قيمة الحمل ، ومعامل قدرته ، كما هو واضح في شكل (٨-١٠) .

يمكن الاستعاضة عن الممانع باستخدام محول اضافة (booster transformer) كما هو مبين في شكل (٨-١١) ب). ويلاحظ أنه يمكننا التحكم في زاوية الاختلاف المرحلي θ بين V_r و V_r' عن طريق تغيير قيمة v_{by} ، وذلك باستخدام نسبة تحويل مختلفة لمحول الاضافة . ومن الواضح أن هذه الطريقة مناسبة للاستخدام مع المحولات ثلاثية المراحل ، حيث يمكن تنفيذ محول الاضافة في كل مرحلة بين خطي المرحلتين الآخريتين ، للحصول على الضغط المناسب ، لعمل التغيير المطلوب .

تنظيم الضغط بتغيير نقطة التقسيم :

(Voltage control by tap — changing)

يمكن عن طريق تغيير عدد اللفات ، في أحد الملفين الابتدائي أو الثانوي ، تغيير نسبة تحويل الضغط ، والحصول بالتالي على ضغط متغير . ويتم ذلك عن طريق عمل نقاط تقسيم (tapping points) على الملف ، بحيث يعطى التوصيل



شكل (١١-٨)

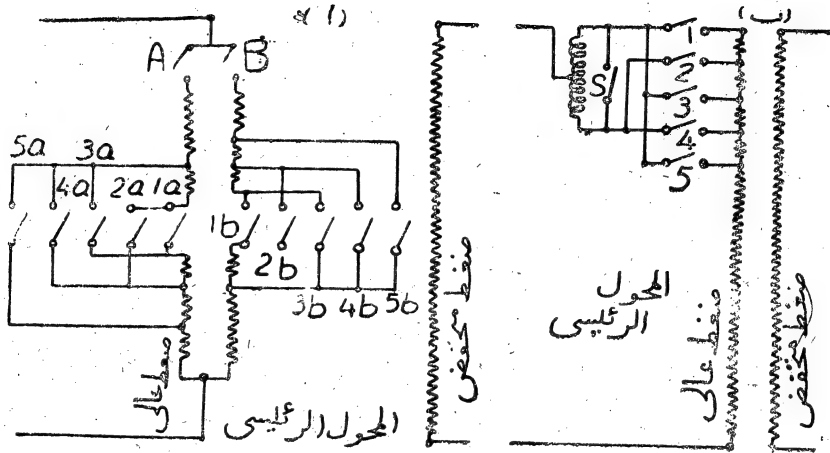
عند كل نقطة منها ضغطاً مختلفاً . يبين شكل (١١-٨ أ) محولاً به أربع نقط تقسيم في الملف الثانوى (١ , ٢ , ٣ , ٤) ، يعطى التوصيل عليها أربعة ضغوط مختلفة (ومتقاربة بطبيعة الحال) . وليس من الضروري أن تكون نقط التقسيم عند الطرف الخارج للملف ، كما هو مبين في الشكل ، إذ يمكن عملها في منتصف الملف ، وكذلك ناحية نقطة التعادل (في الملفات ثلاثية المراحل) . هذا ، ويتم عمل التقسيم في الغالب على ملف الضغط العالى ، للأسباب الآتية :

١ — أن ملف الضغط العالى هو الملف الخارجى (يكون موضع ملف الضغط المنخفض ناحية القلب الحديدى) فيسهل بذلك الوصول إلى نقط التقسيم عليه .

٢ — أن كثرة عدد اللفات (نسبياً) في ملف الضغط العالى يجعل من السهل تغيير الضغط في حدود متقاربة جداً ، مع فرصة امكان تغيير عدد اللفات ، لهذا الغرض ، بمقدار لفة واحدة فقط .

٣ — أن التيار في ملف الضغط العالى يكون صغيراً بالنسبة للتيار في ملف الضغط المنخفض ، مما يجعل عمل التوصيلات ، والتلامسات الخاصة بنقط التقسيم ،

أكثر سهولة .



شكل (١٢ - أ)

وقد يكون المحول معداً على أساس التغير على نقطه التقسيم في حاله اللاحل (off - load tap - changing) ، كما أن الامر قد يستلزم التغير على نقطه التقسيم في أثناء وجود الحمل (on - load tap - changing) ، حيث يجب اتخاذ احتياطات معينة ، تتمثل في استخدام مثل الطرق الآتية :

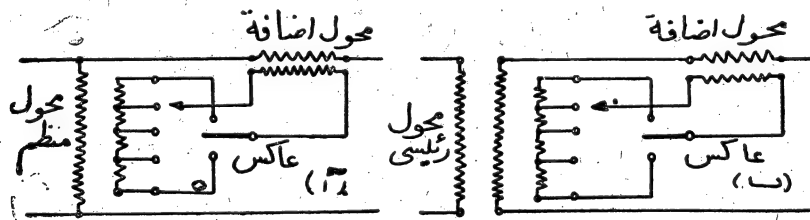
١ - استخدام مسارين متوازيين :

إذا أمكن إعداد الملف المحتوى على نقطه التقسيم من مسارين متوازيين ، فإنه يمكن تحميل أحدهما بالحمل كله ، وقطع التيار عن الآخر ، وذلك في أثناء التغير على نقطه التقسيم فيه . يبين شكل (١٢ - أ) ، محتوى ملف الضغط العالي فيه على مسارين متوازيين ، ويتم لإجراء التغير في نقطه تقسيمه على النحو التالي : عندما يكون المحول عاملاً على نقطتي التقسيم 1b, 1a في ملف الضغط العالي ، يكون المفتاحان A , B مقفولين . يفتح أحد المفتاحين ، وليكن A ،

فيصبح الحل بأكمله في المسار الذي يحتوي على المفتاح B ، فيتم النقل من نقطة التقسيم 1a ، بفتح المفتاح الخاص بها ، إلى نقطة التقسيم 2a ، بقفل المفتاح الخاص بها . ثم يقلل A ويفتح B لعمل التغير المناظر . وعند قفل B بعد ذلك يصبح المحول عاملاً على نقطتي التقسيم 2a, 2b . ويلاحظ أنه في منتصف فترة التغير ، عندما يكون كلا من A, B مقفلين ، والمحول موصل على نقطة التقسيم 2a في مسار و 1b في المسار الآخر ، يمر تيار محلي بين الملفات ، زيادة على التيار الأصلي . ولتقليل قيمة هذا التيار المحلي على قدر الإمكان تستخدم عازلة ، يكون موضعها في مسار هذا التيار ، بحيث تكبر معاوقته . كما هو مبين في شكل (١٢) — ٨ب .

(ب) استخدام محول منظم :

يقوم هذا المحول بمهمة تغيير الضغط في الحدود المطلوبة ، بحيث لا يحتاج إلى عمل نقط تقسيم على المحول الرئيسي ، ويستخدم في هذه الحالة محول إضافة ، كما هو مبين في شكل (١٣- أ) . هذا ويمكن عمل نقط التقسيم ، اللازمة لتنظيم



شكل (١٣- أ)

الضغط على ملف ثالث في المحول الرئيسي نفسه ، بدلاً من استخدام محول منظم قائم بذاته ، شكل (١٣- ب)

ثانيا - تشغيل المحولات على التوازي

نحتاج في بعض الاحيان إلى استخدام أكثر من محول واحد لتشغيل حمل كبير ، لا يمكن أن يقوم به محول واحد من المحولات التي يسهل الحصول عليها . ولا يتعمد الأمر ، في أغلب الاحوال ، الحاجة إلى توصيل محولين على التوازي ، من ناحيتي الضغط العالي والضغط المنخفض . لذلك سوف يقتصر التحليل الآتي على هذه الحالة فقط . ويمكن الاستفادة بهذا التحليل ، والسير على نمطه ، في غير ذلك من الحالات الطارئة . هذا ونظرا لأن الاصل في التحليلات المختلفة هو اعتبار القيم المرحلية عادة ، فسوف نبدأ بدراسة الموضوع بالنسبة للمحولات مفردة المرحلة ، على أن يستفاد بالنظريات والقواعد التي نحصل عليها في تحليل المحولات ثلاثية المراحل ، على أساس الدراسة بالنسبة لكل مرحلة فيها . وإلى جانب ذلك يجب دراسة تأثير توصيلات المراحل المختلفة ، في مثل هذه المحولات ، على مدى امكانية تشغيلها على التوازي معا . وسوف يتضح لنا فيما بعد أن هناك توصيلات معينة فقط للمحولات ثلاثية المراحل ، يمكن معها توصيلها على التوازي ، حيث يمتنع توصيلها في غير ذلك من الحالات .

شروط تشغيل المحولات على التوازي :

يجب أن تتوفر عدة شروط قبل أن نستطيع توصيل محولين على التوازي معا . وهذا ينطبق على حالة المحولات مفردة المرحلة ، وبالنسبة للقيم المرحلية في المحولات ثلاثية المراحل . ويزيد على هذه الشروط نوعية توصيل المراحل ، بالنسبة لهذا النوع الأخير من المحولات ، كما سبق ذكره . وإلى جانب ذلك كله يوجد شرط عام ، يجب ألا نغفله ، وهو يختص بتشغيل أى نوعين من الآلات على التوازي . وينص هذا الشرط على أن تكون قدرتا الآلتين ، المراد تشغيلها

على التوازي ، متقاربتين على قدر الإمكان ، حيث لا يوجد ما يمنع من تشغيل آلتين على التوازي بسبب اختلاف قدرتهما . والحكمة في هذا الشرط ألا يؤدي أى اختلاف صغير ، في تحميل الآلة الكبيرة ، إلى القاء عبء متزايد ، قد يؤدي إلى حدوث حالة تعدي الحمل ، على الآلة الصغيرة ، وذلك عند تشغيل آلتين على التوازي ، تختلف قدرتهما اختلافا كبيرا . وشروط تشغيل المحولات على التوازي هي :

١ — أن تمتلك نفس نسبة تحويل الضغط .

٢ — أن يكون هبوط الضغط النسبي متساويا في كل منها عدديا ، ومتوافقا مرحليا .

٣ — أن تراعى قطبية الأطراف عند توصيلها ، فتوصل الأطراف ذات القطبية المتماثلة معا .

٤ — أن يراعى توافق النعاقب المرحلي ، بالنسبة للمحول ثلاثية المراحل ؛ وفيما يلي نبذة صغيرة عن كل شرط من هذه الشروط .

نسبة تحويل الضغط :

إن اتماق نسبة تحويل الضغط ، في حولين يعملان على التوازي ، يجعلنا نحصل على نفس الضغط على طرفي كل من مافي الضغط الثانويين في المحولين ، في حالة عدم وجود الحمل ، عند توصيل ملفيهما الابتدائيين على التوازي على ينبوع واحد . وهذا يمنع مرور تيارات محمية بين الملفين الثانويين ، تلك التيارات التي تزداد قيمتها كلما ازداد مقدار الاختلاف بين نسبتي تحويل الضغط في المحولين ، وازداد تبعاً لذلك فرق الضغط على طرفي الملفين الثانويين . ويكون

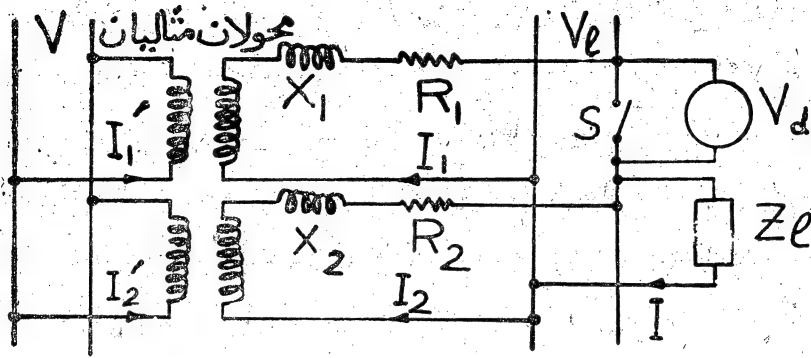
مرور التيار المحلى بين هذين الملفين ، عند تحميل المحولين ، بحيث يكون في اتجاه تيار الحمل في أحدهما ، وفي عكس اتجاه تيار الحمل في الآخر ، مما قد يؤدي إلى تعدى الحمل بالنسبة للآخر ، عندما يكون توزيع الحمل الكلى بين المحولين بحيث يتم تحميل كل منهما بحمله الكامل . هذا إلى جانب وجود مفايد نحاسية زائدة بسبب وجود التيارات المحلية في حالة عدم وجود الحمل . وبما يزيد من أهمية هذه التيارات أن الدائرة المحلية التي تمر فيها تحتوي على معاوفى المحولين على التوالي ، وهما صغيرتان جدا كما هو معلوم .

هبوط الضغط المناسب في المحولين :

يستلزم توصيل الملفين الابتدائيين ، للمحولين العاملين على التوازي ، إلى نفس الينبوع ، واشتراك الملفين الثانويين في الضغط على طرفي الحمل ، أن يكون معامل التنظيم واحدا في المحولين . وهذا يعنى أن ينساوى هبوط الضغط IZ في المحولين في القيمة ، وفي الاتجاه أيضا ، كما سبق ذكره . وليس من الضروري أن تنساوى المقاومتان والممانعتان ، كل على حدة ، في المحولين في هذه الحالة . ويترتب على اختلاف نسبة الممانعة إلى المقاومة عدم تساوى زاوية الاختلاف المرحلى للتيار بالنسبة للضغط الطرفى على الحمل ، فى كل من المحولين .

قطبية الاطراف :

يراعى توصيل الاطراف ، التي لها نفس القطبية ، معاً . وينشأ عن وجود خطأ فى القطبية عند التوصيل ، أن يصبح الملفان الثانويان مقصودين بضعف الضغط ، مما يتسبب فى مرور تيار قصر هائل قبل التوصيل إلى الحمل . لذلك يجب التحقق من صحة التوصيل ، بالنسبة للقطبية ، قبل أن يصبح الملفان الثانويان متصلين على التوازي مما على طرفي الحمل ، ويكون ذلك بوضع مفتاح S بينهما



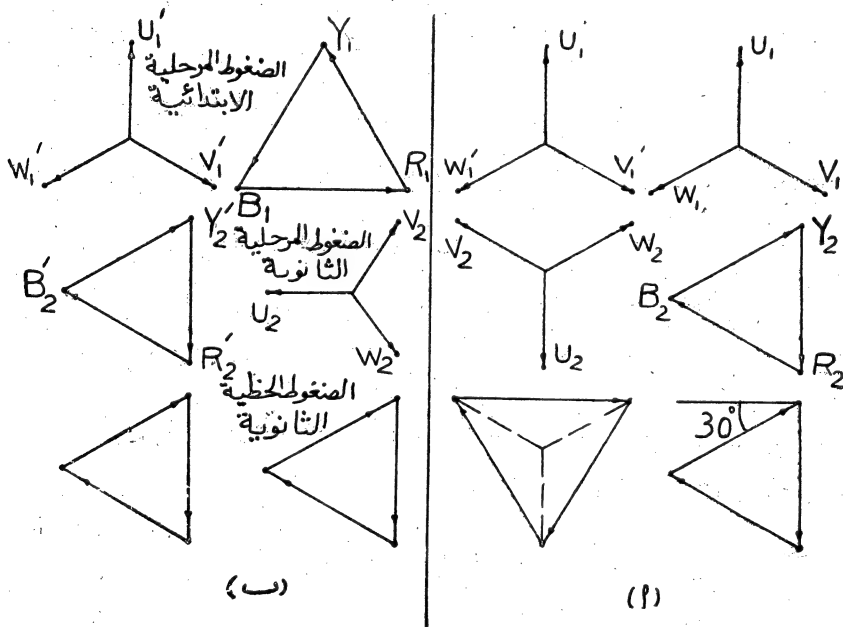
شكل (١٤ - أ)

وتوصيل فولتير على طرفيه ، كما هو مبين في شكل (١٤ - أ) . يمكن قفل المفتاح عندما يقرأ الفولتير صفراً ، كما أنه يجب عكس قطبية الأطراف قبل توصيل المفتاح ، إذا قرأ الفولتير ضعف الضغط الثانوي ، ثم التأكد من أنه أصبح يقرأ صفراً .

تعاقب المراحل :

يراعى بالنسبة للدحولات ثلاثية المراحل أن يكون تعاقب المراحل متماثلاً في المحولين ، وإلا فسوف تحدث دائرة قصر بين كل مرحلتين في خلال كل دورة . فإذا أردنا توصيل أطراف الملفات الثانوية الثلاثة w_2, v_2, u_2 لمحول ، مع أطراف الملفات الثانوية الثلاثة w'_2, v'_2, u'_2 لمحول يعمل معه التوازي ، يوصل أولاً الطرف u'_2 مع الطرف u_2 ، فإذا ظهرت قيمة للضغط بين v_2, v'_2 ، أو w_2, w'_2 فإن هذا يعني أن التعاقب المرحلي لأحد المحولين مختلف عن الآخر . ويتم التأكد من ذلك بقياس الضغط بين u_2, v_2 أو u'_2, v'_2 ، فيكون مساوياً للصفر في هذه الحالة . ويكون اصلاح الخطأ باستبدال توصيل طرفين من أطراف أحد المحولين مع الطرفين المناظرين للدحول الآخر . ويرتبط بموضوع التعاقب المرحلي ، في

المحولات ثلاثية المراحل، موضوع الاختلاف المرحلي في الضغوط الثانوية المتناظرة للمحولين ، عند توصيلهما على التوازي ، نتيجة لعدم التماثل في توصيل المراحل في المحولين . وتجد لهذا السبب أن هناك أنواعا معينة معدودة ، من التوصيلات غير المتماثلة ، يصح معها توصيل المحولين على التوازي معا . وفي هذه الحالة تكون الضغوط الثانوية المتناظرة متفقة معا مرحليا (علاوة على اتفاقها في القيمة) على الرغم من تباين التوصيلات الداخلية في المحولين . وعلى العموم يجب مراجعة العلاقة بين الضغوط الثانوية المتناظرة من حيث القيمة والاتجاه ، عندما نحتاج التوصيلات الداخلية بين المراحل في المحولين ، وذلك قبل الحكم على صلاحيتها للعمل على التوازي معا . ويمتنع تشغيلهما على التوازي عند وجود اختلاف مرحلي بين الضغوط المتناظرة ، أما إذا اختلفت هذه الضغوط في القيمة ، فيمكن

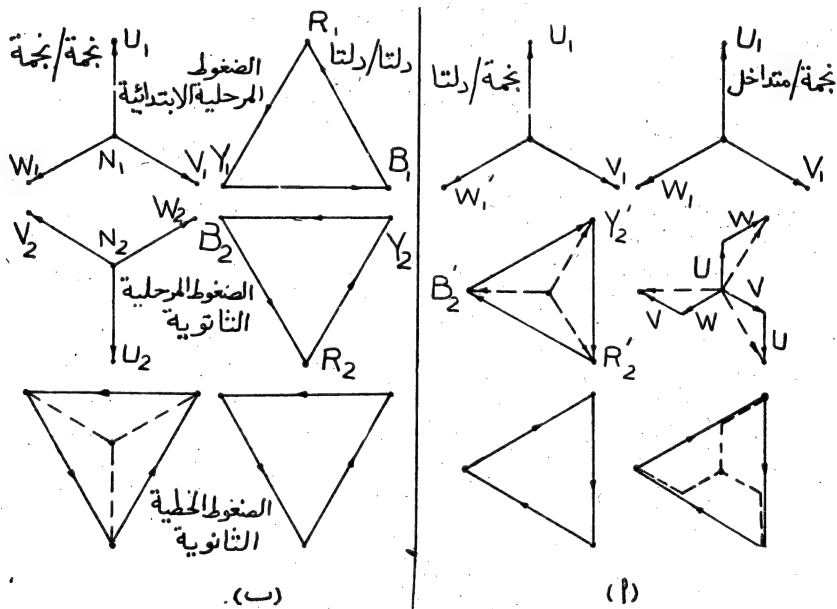


شكل (١٥ - ٨)

معالجة ذلك بضبط نسبة التحويل في أحد المحولين ، باستخدام نقاط تقسيم على الملفات لهذا الغرض ، بحيث نحصل على نفس قيمة الضغط الثانوى في المحولين. ويراعى ، عند مراجعة التافل المرحلى بين الضغوط الثانوية ، أن الضغط الثانوى لاية مرحلة يختلف مرحليا بمقدار 180 درجة عن ضغط الينبوع الموصول الى الملف الابتدائى لنفس المرحلة .

نورد فيما يلى بعض التوصيلات التقليدية غير المتماثلة التى يصح معها التوصيل على التوازى :

المحول الاول : نجمة/نجمة	تجمة/دلتا	نجمة/دلتا
المحول الثانى : دلتا/دلتا	دلتا/نجمة	نجمة/متداخل *



شكل (١٦ - أ)

* التوصيل المتداخل (Zigzag connection) للملفات الثانوية مبين فى شكل (١١ - أ)

ويبين شكل (١٥-٨ ب) ، (١٦-٨ أ ، ب) كيف تتفق الضغوط الثانوية المتناظرة مرحليا ، وفي القيمة أيضا ، على الرغم من اختلاف التوصيلات المرحلية في المحولين . كذلك يبين شكل (١٥-٨ أ) كيف تختلف الضغوط الثانوية بسبب اختلاف التوصيلات المرحلية في المحولين .

توزيع الحمل (أو التيار) بين محولين على التوازي :

(Distribution of load (or current) between two transformers working in parallel)

عند تشغيل المحولين على التوازي يوصل الملفان الابتدائيان ، على اليمين ، على الذي ضغطه V ، على التوازي معا . ويوصل الملفان الثانويان مع الحمل ، على التوازي معا ، حيث يكون الضغط المشترك على طرفي كل منهما ، وعلى طرفي الحمل أيضا ، V_1 كما هو مبين في شكل (١٤-٨) . وسوف نستعين بالدائرتين المكافئتين للمحولين ، منسوبتين إلى ناحية الضغط العالي ، أو ناحية الضغط المنخفض ، وهي ناحية الحمل عادة ، عند عمل الحسابات الخاصة بتوزيع الحمل أو التيار . وسوف نفترض لذلك أن المقاومة المكافئة (في حالة المحول مفرد المرحلة) ، أو المقاومة المرحلية المكافئة (في حالة المحول ثلاثي المراحل) ، منسوبة إلى ناحية الحمل ، هي R_1 للمحول الأول ، و R_2 للمحول الثاني . وأن ممانعة التمربب المتناظرة هي X_1 للمحول الأول ، و X_2 للمحول الثاني . ويكون تيار الحمل الكلي I ، يخص المحول الأول منه التيار I_1 ، ويخص المحول الثاني I_2 . كما يكون تيار اليمين الخاص بالمحول الأول I'_1 ، وتيار اليمين الخاص بالمحول الثاني I'_2 ، يتم تحويلهما باستخدام محولين مثاليين ، كما هو مبين في شكل (١٤-٨) . فإذا فرضنا أن نسبة تحويل المحول الأول α_1 ، ونسبة تحويل المحول الثاني هي α_2 نجد أننا

بحاجة إلى دراسة توزيع الحمل بين المحولين في حالتين أساسيتين ، وذلك عندما تتساوى α_1 مع α_2 ، ثم عندما تختلفان اختلافا طفيفا .

١ - توزيع الحمل عندما تتساوى نسبتي التحويل في المحولين :

يكون هبوط الضغط في المحول الأول مساويا في القيمة ، ومتفقا مرحليا ، مع هبوط الضغط في المحول الثاني ، وهذه نتيجة حتمية لتساوى الضغط على طرفي كل من الملفين الابتدائيين ، والملفين الثانويين ، في هذه الحالة . ويمكن التعبير عن هذه الحقيقة الواقعة بالمعادلة الآتية ، التي سوف تتخذ أساسا للحساب بعد ذلك :

$$\dot{v} = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = \dot{I}_2 \dot{Z}_2 = \dot{I} \dot{Z} = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dots (\lambda - 23)$$

حيث :

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad , \quad \dot{Z} = \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad , \quad \dot{I} = I | \underline{\phi}$$

$$\dot{Z}_1 = R_1 + j X_1 \quad , \quad \dot{Z}_2 = R_2 + j X_2$$

وينتج من ذلك أن :

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{v}}{\dot{Z}_1} = \dot{I} \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = I_1 | \underline{\phi_1}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{v}}{\dot{Z}_2} = \dot{I} \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = I_2 | \underline{\phi_2} \quad \dots \dots (\lambda - 24)$$

وهذا يعنى أن التيار يوزع بين المحولين بالنسبة العكسية لمعاوقة التسرب فيهما ، فياخذ المحول ذو المعاوقة الأكبر التيار الأصغر ، وبالعكس . ونجب مراعاة ذلك عند توصيل محولين على التوازي معا ، فلا تكون معاوقتهما مختلفتين اختلافاً بينا ، ويكون حجمهما بالنسبة متفاوتين متفاوتا كبيرا ، كما سبق ذكره . ونظراً لأن الضغط V_l واحد بالنسبة للحمل ، ولكل من الملفين الثانويين معا ، يمكن ، بضرب المعادلات السابقة في قيمة هذا الضغط ، أن نحصل على توزيع الحمل الكلى بالكيلو فولت أمبير Q (باعتبار كميته موجهة نتيجة لضرب متجه التيار في قيمة الضغط) على المحولين على النحو التالي :

$$Q_1 = \dot{Q} \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} , \quad Q_2 = \dot{Q} \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dots\dots\dots (٨-٢٥)$$

حيث :

$$\dot{Q}_1 = I_1 V_l = I_1 V_l | \phi_1 = Q_1 | \phi_1$$

$$\dot{Q}_2 = I_2 V_l = I_2 V_l | \phi_2 = Q_2 | \phi_2$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \dot{I} V_l = I V_l | \phi = Q | \phi \dots\dots\dots (٨-٢٦)$$

وبالنسبة للحمل الكلى بالكيلو وات KW ، وتوزيعه إلى الحملين KW_2, KW_1

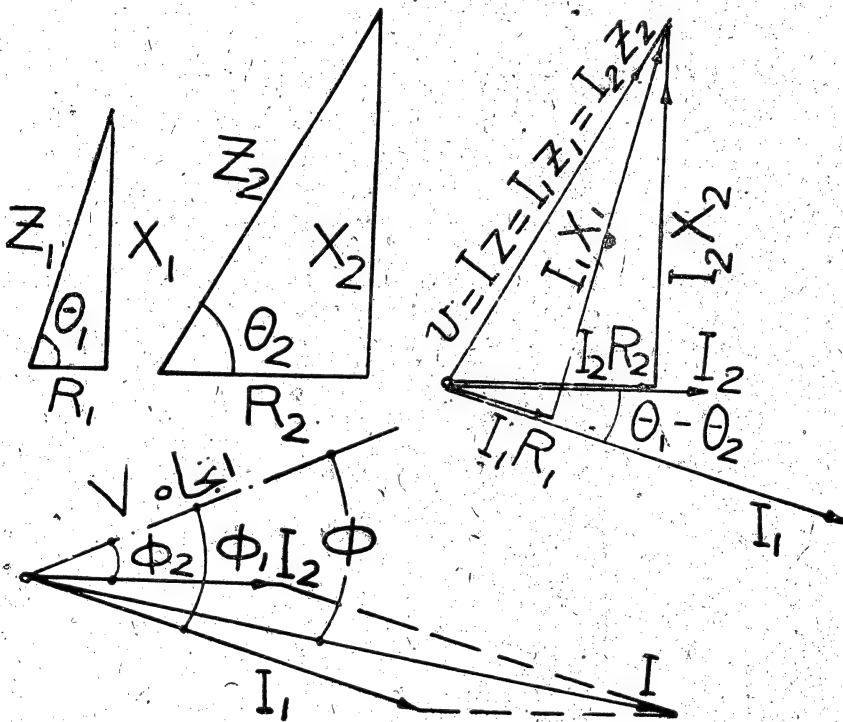
على المحولين، نجد أن :

$$KW = Q \cos \phi = I V_l \cos \phi$$

$$KW_1 = Q_1 \cos \phi_1 = I_1 V_l \cos \phi_1$$

$$KW_2 = Q_2 \cos \phi_2 = I_2 V_l \cos \phi_2 \dots\dots\dots (٨-٢٧)$$

هذا ويجب ألا ننسى، في خلال ذلك كله، أن استخدامنا V_I بالقيمة فقط،
يعنى أننا اعتبرناها منطبقة على المحور المرجعي، أو اتخذناها هي نفسها محورا
مرجعيا، كما سبق فعله في حالات كثيرة.



شكل (١٧-٨)

يمكن الحصول على توزيع التيار (أو الكيلو فولت أمبير) باستخدام الرسم
باتباع الطريقة المبينة في شكل (١٧-٨). وتعتمد هذه الطريقة أساسا على أن
متجهي هبوط الضغط في المحولين يكونان منطبقين تماما، على الرغم من اختلاف
قيمتي المقاومة وممانعة التسرب في المحولين، وكذلك اختلاف قيمة الزاوية

$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{X_1}{R_1}$ للمحول الأول، عن الزاوية $\theta_2 = \tan^{-1} \frac{X_2}{R_2}$ في المحول الثاني. نبدأ برسم مثلثي المعاوقة للمحولين، بحيث تنطبق المقاومتان على المحور المرجعي، وبمقياس رسم مناسب. بذلك تصبح الزاوية بين متجهي المعاوقة Z_1 و Z_2 عبارة عن $\theta_1 - \theta_2$ (بفرض أن $\theta_1 > \theta_2$). فاذا راعينا أن القيمة العددية $I_1 Z_1$ تساوي القيمة العددية $I_2 Z_2$ ، نجد أن $\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$. وهذا يعني أن النسبة بين قيمتي التيار في المحولين تساوي مقلوب النسبة بين معاوقتهما، مما يجعلنا نستطيع تحديد قيمة كل من التيارين، على أساس هذه النسبة، وذلك بمقياس رسم معين، غير معروف بعد. ويكون ذلك بأن نحدد طول I_2 مساويا Z_1 ، وطول I_1 مساويا Z_2 ، على أساس أن الزاوية بين اتجاهي هذين التيارين هي $\theta_1 - \theta_2$ ، وبحيث يكون I_2 في اتجاه Z_2 ، I_1 في اتجاه Z_1 ، كما هو مبين في شكل (١٧-٨). بجمع متجهي التيارين I_1 و I_2 نحصل على متجه تيار الحمل الكلي I بنفس مقياس الرسم لهدين التيارين، الذي لم يتحدد بعد. ونظرا لأن قيمة I معروفة، فانا نستطيع تحديد مقياس الرسم لهذه التيارات جميعا، حيث يكون:

$$\text{كل اسم يمثل} \frac{I \text{ أمبير}}{\text{طول } I \text{ بالسنتيمترات}} \text{ أمبير}$$

وتحدد زاويتا الاختلاف المرحلي للتيارين، مع الضغط المرحلي V ، برسم متجه هذا الضغط، بحيث يصنع مع التيار I زاوية الاختلاف المرحلي المعروفة ϕ ، كما هو مبين في شكل (١٧-٨).

يمكن استخدام Q_1 و Q_2 بدلا من I_1 و I_2 كما سبق شرحه بالنسبة للحل التحليلي.

يكون استخدام الوسائل السابقة لتحديد كل من I_2, I_1 ، وزاوية الاختلاف المرحلي لكل منهما ، على أساس معرفة R_2, R_1 وكذلك X_1, X_2 . ولكن توجد حالات يكون معلوما فيها هبوط الضغط النسبي ϵ_r ، في المقاومة ، لكل من المحولين ، وكذلك هبوط الضغط النسبي ϵ_x ، في ممانعة التسرب ، لكل من المحولين ، حيث :

$$\epsilon_{r1} = \frac{I_1 R_1}{V} , \quad \epsilon_{r2} = \frac{I_2 R_2}{V}$$

$$\epsilon_{x1} = \frac{I_1 X_1}{V} , \quad \epsilon_{x2} = \frac{I_2 X_2}{V} \dots\dots\dots (٨-٢٨)$$

ويكون الحل المباشر ، في هذه الحالة ، أن نحصل أولاً على كل من R_1, R_2 ، وكذلك X_1, X_2 من المعلومات المتوفرة لدينا ، ثم نتابع الحل على نفس الوتيرة السابقة . ولكننا نستطيع اختصار الخطوة الأولى ، واستخدام الضغوط النسبية بدلا من المقاومات ، وممانعات التسرب المناظرة . دون أن يتأثر الحل ، إذا كان $I_2 = I_1$ ، أو إذا كان $Q_1 = Q_2$ ، بمعنى أصح فإذا لم يتوفر هذا الشرط ، وجب علينا الحصول على ضغوط نسبية مكافئة ϵ_{r1} و ϵ_{r2} و ϵ_{x1} و ϵ_{x2} ، منسوبة إلى تيار موحد I_b ، وذلك على أساس القيم الفعلية لكل من R_2, R_1 وكذلك X_2, X_1 ، كما نحصل عليها من المعادلة (٨-٢٨) ، بدلالة الضغوط النسبية المعطاة . ونحصل على التيار الموحد I_b بقرض قدرة ظاهرية أساسية ϕ_b (base KVA) ، لتحديد قيمتها كما نشاء . وبناء على هذا كله نجد أن :

$$Q_b = V I_b \times 10^{-3} , \quad I_b = \frac{Q_b \times 10^3}{V}$$

$$R_1 = \frac{V \varepsilon_{r1}}{I_1} , \quad \varepsilon'_{r1} = \frac{I_b V \varepsilon_{r1}}{I_1 V} = \varepsilon_{r1} \frac{Q_b}{Q_1}$$

$$R_2 = \frac{V \varepsilon_{r2}}{I_2} , \quad \varepsilon'_{r2} = \frac{I_b V \varepsilon_{r2}}{I_2 V} = \varepsilon_{r2} \frac{Q_b}{Q_2}$$

$$X_1 = \frac{V \varepsilon_{x1}}{I_1} , \quad \varepsilon'_{x1} = \frac{I_b V \varepsilon_{x1}}{I_1 V} = \varepsilon_{x1} \frac{Q_b}{Q_1}$$

$$X_2 = \frac{V \varepsilon_{x2}}{I_2} , \quad \varepsilon'_{x2} = \frac{I_b V \varepsilon_{x2}}{I_2 V} = \varepsilon_{x2} \frac{Q_b}{Q_2} \quad (٨-٢٩)$$

وهذا يعنى أن كل ما هو مطلوب منا عمله ، للحصول على الضغوط النسبية ،
التي يمكن استخدامها في الحل بدلا من المقاومات والمعاوقات ، أن نضرب كلا
من الضغوط النسبية المعطاة في نسبة القدرة الظاهرية الأساسية ، التي نختارها كما
نشاء* ، إلى القدرة الظاهرية المحسوب على أساسها الضغط النسبي المناظر .

٢ - توزيع التيار (او الحمل) عند اختلاف نسبة التحويل :

يختلف الضغط على طرفي كل من الملفين الثانويين للدواوين ، في حالة اللاحمل
قبل توصيلهما على التوازي معا ، باعتبار أن الملفين الابتدائيين موصلان إلى التنبوع
الذي ضغطه V . نفترض ، في هذه الحالة ، أن نسبة التحويل في المحول الأول
 α_1 ، وفي المحول الثاني α_2 (باعتبار محولين اثنين موصلين على التوازي) ، وأن
الضغط على طرفي الملف الثانوي للمحول الأول ، في حالة عدم وجود الحمل ،
وقبل توصيل الملفين الثانويين على التوازي ، هو V_1 ، وأن الضغط المناظر على

* نختار عادة القدرة الظاهرية لأحد المحولين كأساس ، فلانحسب له ضغوط
نسبية ظاهرية جديدة ، ونوفر بذلك بعض العمليات الحسابية .

طرفى الملف الثانوى للمحول الثانى هو V_2 . يمكن ، للحصول على توزيع التيار (أو الحمل بالكيلوفولت أمبير) ، اجراء الحل بطريقتين ، على النحو التالى :

اولا : عند توصيل الملفين الثانويين على التوازي ووضع الحمل عليهما (أى بعد قفل المفتاح S شكل (١٤ - ٨)) يصبح الضغط على كل من طرفى الملفين الثانويين واحدا وهو V_I ، ولكن يختلف الضغط المحول بواسطة المحول المثالى فيصبح $\frac{V}{\alpha_1}$ بالنسبة للمحول الاول و $\frac{V}{\alpha_2}$ بالنسبة للمحول الثانى . لذلك نجد أن هبوط الضغط $\dot{Z}_1 I_1$ فى المحول الاول يساوى $\dot{V}_I - \frac{\dot{V}}{\alpha_1}$ ، وهبوط الضغط فى المحول الثانى $\dot{Z}_2 I_2$ يساوى $\dot{V}_I - \frac{\dot{V}}{\alpha_2}$ ، عند مرور التيار الحمل \dot{I} الذى يساوى $\dot{I}_1 + \dot{I}_2$ فى هذه الحالة . وتعميم الحل لعدة محولات تعمل على التوازي معا ، بحيث تمتلك نسب تحويل مختلفة α_1 ، α_2 ، α_3 ، ... ألخ ، واتخاذ ضغط الينبوع V كمحور مرجعى ، يمكن الحصول على توزيع تيار الحمل \dot{I} على المحولات المختلفة من المعادلات الآتية :

$$\frac{V}{\alpha_1} - \dot{V}_I = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = \frac{\dot{I}_1}{\dot{Y}_1} \left(\dot{Y}_1 = \frac{1}{\dot{Z}_1} \right)$$

$$\frac{V}{\alpha_2} - \dot{V}_I = \dot{I}_2 \dot{Z}_2 = \frac{\dot{I}_2}{\dot{Y}_2} \left(\dot{Y}_2 = \frac{1}{\dot{Z}_2} \right)$$

$$\frac{V}{\alpha_3} - \dot{V}_I = \dot{I}_3 \dot{Z}_3 = \frac{\dot{I}_3}{\dot{Y}_3} \left(\dot{Y}_3 = \frac{1}{\dot{Z}_3} \right) \dots\dots (٨-٢٠)$$

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dots = \dot{Y}_1 \left(\frac{V}{\alpha_1} - \dot{V}_l \right) \\ &+ \dot{Y}_2 \left(\frac{V}{\alpha_2} - \dot{V}_l \right) + \dot{Y}_3 \left(\frac{V}{\alpha_3} - \dot{V}_l \right) \\ &= V \left(\frac{\dot{Y}_1}{\alpha_1} + \frac{\dot{Y}_2}{\alpha_2} + \frac{\dot{Y}_3}{\alpha_3} + \dots \right) \\ &- \dot{V}_l (\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 + \dots) \dots \dots (٨-٢١) \end{aligned}$$

بوضع

$$\begin{aligned} \alpha'_1 &= \frac{1}{\alpha_1} , \quad \alpha'_2 = \frac{1}{\alpha_2} , \quad \alpha'_3 = \frac{1}{\alpha_3} \\ \dot{I} &= \frac{\dot{V}_l}{\dot{Z}_l} = \dot{V}_l \dot{Y}_l \left(\dot{Y}_l = \frac{1}{\dot{Z}_l} \right) \\ \therefore \dot{V}_l &= \dot{V} \frac{(\alpha'_1 \dot{Y}_1 + \alpha'_2 \dot{Y}_2 + \alpha'_3 \dot{Y}_3 + \dots)}{(\dot{Y}_l + \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 + \dots)} \quad (٨-٢٢) \end{aligned}$$

بذلك نستطيع ، باستخدام المعادلة (٨-٢٢) ، أن نحصل على \dot{V}_l أولاً ،

ثم نحصل ، بالتعويض بها في المعادلات (٨-٣٠) ، على التيارات $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3 \dots$

حيث :

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{Y}_1 (\alpha'_1 V - \dot{V}_l) \\ \dot{I}_2 &= \dot{Y}_2 (\alpha'_2 V - \dot{V}_l) \\ \dot{I}_3 &= \dot{Y}_3 (\alpha'_3 V - \dot{V}_l) \dots \dots \dots (٨-٢٣) \end{aligned}$$

ثانياً : يكون الضغط على طرفي الملف الثانوى في المحول المثالى الاول هو

$$V_1 = \frac{V}{\alpha_1} \quad , \quad \text{والضغط على طرفي الملف الثانوى في المحول المثالى الثانى}$$

$$V_2 = \frac{V}{\alpha_2} \quad (\text{نستخدم هذه الطريقة في حالة محولين يعملان على التوازي فقط}).$$

وما لم يكن هناك سبب معين يدعو إلى وجود اختلاف مرحلى بين V_2, V_1 ، فإننا نعتبرهما عادة في اتفاق مرحلى معاً ، ومع ضغط الينبوع V في نفس الوقت .
ونستطيع ، في هذه الحالة ، الحصول على التيارين I_1, I_2 بالاستفادة من العلاقات الآتية :

$$\dot{V} = \dot{I} \dot{Z}_{12} = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

$$\alpha'_1 V = V_1 = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) \dot{Z}_l$$

$$\alpha'_2 V = V_2 = \dot{I}_2 \dot{Z}_2 + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) \dot{Z}_l \quad \dots\dots\dots (٨-٣٤)$$

$$\therefore V_1 - V_2 = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 - \dot{I}_2 \dot{Z}_2 \quad \dots\dots\dots (٨-٣٥)$$

$$\therefore \dot{I}_1 = \frac{(V_1 - V_2) + \dot{I}_2 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1} \quad \dots\dots\dots (٨-٣٦)$$

بالنعويض من المعادلة (٨-٣٦) في المعادلة (٨-٣٤) ، نجد أن :

$$V_2 = \dot{I}_2 \dot{Z}_2 + \left[\frac{(V_1 - V_2) + \dot{I}_2 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1} + \dot{I}_2 \right] \dot{Z}_l$$

$$\therefore \dot{I}_2 = \frac{V_2 \dot{Z}_1 - (V_1 - V_2) \dot{Z}_I}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_I (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)} \dots\dots\dots (٨-٣٧)$$

وبالمثل يمكن حل المعادلات بالنسبة لـ \dot{I}_1 ، فنحصل على :

$$\dot{I}_1 = \frac{V_1 \dot{Z}_2 + (V_1 - V_2) \dot{Z}_I}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_I (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)} \dots\dots\dots (٨-٣٨)$$

عندما يكون هناك اختلاف مرحلي بين الضغطين V_2, V_1 ، كما يحدث عند توصيل محولين ثلاثي المراحل ، أحدهما نجمة/نجمة والآخر نجمة/دلتا مثلاً ، على التوازي ، يجب مراعاة أن كلا من V_2, V_1 أصبح كمية موجهة ، فيستخدم المتجهان \dot{V}_2, \dot{V}_1 في المعادلات السابقة ، بدلا من الرقنين V_2, V_1 ، المنطبقة على المحور المرجعي .

عندما يكون المحولان موصلين على التوازي معا بدون وجود الحمل ، أي عند توصيل المفتاح S في شكل (١٤-٨) ، واعتبار أن Z_I تساوى مالانهاية ، يمر تيار قصر بين المحولين ، في نفس اتجاه تيار الحمل في أحدهما ، وفي عكس اتجاه تيار الحمل في الآخر . ونحصل على قيمة هذا التيار ، بالنسبة لكل من المحولين ، بوضع قيمة Z_I بمالا نهاية في المعادلتين (٨-٣٧) ، (٨-٣٨) ، فنجد أن :

$$\dot{I}_{20} = \frac{(V_2 - V_1)}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} , \quad \dot{I}_{10} = \frac{(V_1 - V_2)}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dots (٨-٣٩)$$

$$\therefore \dot{I}_{20} = - \dot{I}_{10}$$

ويتضح من هذا كله أن اختلاف نسبة التحويل في المحولين يؤدي إلى زيادة

نصيب أحدهما من الحمل ، ونقصانه للآخر ، بحيث تكون الزيادة في المحول الذي يمتلك نسبة التحويل الأكبر .

مثال (١) :

A 400 KVA, single phase transformer with reactance drop of 5 % and resistance drop of 1 %, is connected in parallel on both the high voltage and low voltage sides with another 300 KVA, single phase transformer having the same turns ratio, with reactance drop of 6 % and resistance drop of 2.25 %. If the secondary voltage of each transformer is 500 V, find how they will share a load of 600 KVA at 0.8 power factor lagging.

نظرا لاختلاف مقنن القدرة في المحولين ، واعطاء هبوط الضغط النسبي في المقاومتين وممانعتي التسرب ، يجب حساب هبوط الضغط النسبي باعتبار كيلو فولت أمبير أساس ، نختاره يساوى مقنن قدرة أحد المحولين ، وليكن $KVA_b = 400$ ، كما سبق الإشارة إليه . بذلك يظل الضغط النسبي كما هو في المحول الأول ، بينما نحصل على الضغط النسبي ، اللازم لإجراء الحساب ، في المحول

الثاني ، بضرب الضغط النسبي المعطى في النسبة $\frac{KVA_b}{KVA_2} = \frac{400}{300}$. وعلى

هذا الأساس نجد أن :

$$\dot{Z}_1 = (1 + j5) = 5.1 \angle 78.7^\circ \Omega$$

$$\dot{Z}_2 = (2.25 + j6) \times \frac{400}{300} = (3 + j8) = 8.55 \angle 69.4^\circ \Omega$$

$$\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 = (4 + j13) = 13.6 \angle 72.9^\circ \Omega$$

$$\dot{Q} = 600 \angle -36.9^\circ = 480 - j 360$$

$$\dot{Q}_1 = 600 \angle -36.9^\circ \times \frac{8.55 \angle 69.4^\circ}{13.6 \angle 72.9^\circ} = 377 \angle -40.4^\circ$$

$$\cos \phi_1 = 0.7615 \text{ lag. , } KW_1 = 287.5 , I_1 = 754 \angle -40.4^\circ \text{ A}$$

$$\dot{Q}_2 = 600 \angle -36.9^\circ \times \frac{5.1 \angle 78.7^\circ}{13.6 \angle 72.9^\circ} = 224.5 \angle -31.1^\circ$$

$$\cos \phi_2 = 0.8563 \text{ lag. , } KW_2 = 192.5 , I_2 = 449 \angle -31.1^\circ \text{ A}$$

$$KW_1 + KW_2 = 480 = Q \cos \phi = 600 \times 0.8$$

يمكن حل المسألة بالرسم باتباع الطريقة المبينة في شكل (١٧-٨).

مثال (٢) :

A 500 KVA, 3000/510 V, single phase transformer with reactance drop of 4 % and resistance drop of 1 % is connected on the high voltage side to a 3000 V supply in parallel with a 250 KVA, 3000/500 V, single phase transformer having reactance drop of 6% and resistance drop of 1.5 %. With the secondary windings connected in parallel, calculate : (a) the cross currents in the secondaries on no load, (b) the secondary current in each transformer when the total load is 650 KVA at 0.8 power factor lagging, (c) the terminal voltage at this load.

يمكن حل هذه المسألة، بمنتهى الدقة، إذا كان المعلوم هو معاوقة الحمل Z_L ، بدلا من الحمل نفسه، كما هو معطى في رأس المسألة. وفي هذه الحالة (عند

المعطاة (\dot{Z}_I) يمكن ، بالتعويض في المعادلتين $(٨-٣٧)$ ، $(٨-٣٨)$ ، على أساس أن $V_1 = 510$ و $V_2 = 500$ ، حساب كل من \dot{I}_1 ، \dot{I}_2 ، ثم حساب الضغط للطرفي على الحمل \dot{V}_I ، حيث أن :

$$\dot{V}_I = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) \dot{Z}_I = \dot{I} \dot{Z}_I$$

ومن ناحية أخرى يمكن ، بالتعويض في المعادلة $(٨-٣٢)$ ، على أساس أن $\alpha'_1 = \frac{510}{3000}$ ، $\alpha'_2 = \frac{500}{3000}$ ، الحصول على \dot{V}_I مباشرة ، ثم حساب كل من \dot{I}_1 ، \dot{I}_2 باستخدام المعادلات $(٨-٣٣)$ وذلك كله باعتبار أن $V = 3000$ لذلك يجب ، لكي نتمكن من حل المسألة بوضعها الراهن ، أن نحصل أولاً على \dot{Z}_I باستخدام المعلومات المعطاة . وفي هذه الحالة لابد من فرض قيمة تقريبية مبدئية للضغط على طرفي الحمل ، ولتكن 500 فوات . سوف نحصل ، بناء على ذلك ، على نتائج تقريبية ، يمكن استخدامها بعد ذلك للحصول على نتائج أكثر دقة ، وهكذا بطريقة التتابع ، حتى نحصل على النتائج بالدقة المطلوبة . وسوف نكتفي بالنتائج التقريبية الأولى في هذا الحل . نبدأ بحساب X_1 ، R_1 ، ثم Z_1 من القيم المئوية المعطاة ، على أساس مقنن التيار في كل محول I_1 ، I_2 ، حيث :

$$I_1 = \frac{500 \times 1000}{500} = 1000 \text{ A} ,$$

$$I_2 = \frac{250 \times 1000}{500} = 500 \text{ A}$$

$$R_1 = \frac{1 \times 500}{1000 \times 100} = 5 \times 10^{-3} \Omega ,$$

$$X_1 = \frac{4 \times 500}{1000 \times 100} = 2 \times 10^{-2} \Omega$$

$$\dot{Z}_1 = 0.005 + j 0.02 = 0.0206 | \underline{76^\circ} \Omega$$

$$R_2 = \frac{1.5 \times 500}{500 \times 100} = 0.015 \Omega ,$$

$$X_2 = \frac{6 \times 500}{500 \times 100} = 0.06 \Omega$$

$$\dot{Z}_2 = 0.015 + j 0.06 = 0.062 | \underline{76^\circ} \Omega$$

$$\dot{I}_I = \frac{650 \times 1000}{500} | \underline{\cos^{-1} 0.8} = 1300 | \underline{-37^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{Z}_I = \frac{\dot{V}_I}{\dot{I}_I} = \frac{500}{1300 | \underline{-37^\circ}} = 0.384 | \underline{37^\circ} \Omega$$

$$= 0.307 + j 0.23 \Omega$$

للحصول على المطلوب في (a) نعوض في المعادلتين (٢٩-٨) ، حيث :

$$\begin{aligned} I_{10} &= \frac{510 - 500}{0.005 + j 0.02 + 0.015 + j 0.06} = \frac{1000}{8.25 | \underline{76^\circ}} \\ &= 121 | \underline{-76^\circ} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{20} = - \dot{I}_{10} = 121 | \underline{104^\circ}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{510 (0.015 + j 0.06) + 10 (0.307 + j 0.23)}{0.0206 | \underline{76^\circ} \times 0.062 | \underline{76^\circ} + 0.384 | \underline{37^\circ} \times 0.0825 | \underline{76^\circ}}$$

$$= \frac{10.72 + j 32.9}{(-137.3 + j 296) \times 10^{-4}} = \frac{34.7 \angle 72^\circ}{329 \times 10^{-4} \angle 115^\circ}$$

$$= 1050 \angle -34^\circ$$

$$\dot{I}_2 = \frac{500 \times 0.0206 \angle 76^\circ - 10 \times 0.384 \angle 37^\circ}{329 \times 10^{-4} \angle 115^\circ}$$

$$= \frac{-0.53 + j 7.7}{329 \times 10^{-4} \angle 115^\circ}$$

$$= \frac{7.75 \angle 86^\circ}{329 \times 10^{-4} \angle 115^\circ} = 235 \angle -29^\circ$$

$$\dot{V}_I = \dot{V}_1 - \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = 510 - 1050 \angle -43^\circ \times 0.0206 \angle 76^\circ$$

$$= 510 - 21.65 \angle 33^\circ$$

$$= 510 - 18.2 - j 12 = 491.8 - j 12$$

يمكن أن نحسب \dot{V}_I من ناحية المحول الثانى ، ولا يجب أن نتوقع الحصول على نفس النتيجة بالضبط ، بسبب التقريب المفروض .

$$\dot{V}_I = \dot{V}_2 - \dot{I}_2 \dot{Z}_2 = 500 - 235 \angle -29^\circ \times 0.062 \angle 76^\circ$$

$$= 500 - 14.57 (0.682 + j 0.7314)$$

$$= 490.1 - j 10.8$$

ملحوظة :

إذا كانت $V_1 = V_2$ ، أى عند تساوى نسبة التحويل فى المحولين ، فإنه

يمكن حل المسألة بدقة ، إذا كان الحل الكلى معطى ، وذلك بالحصول على قيمة \dot{V}_I

أولا على النحو التالي :

توجد أولا المعاوقة الكلية المكافئة للمعاوقتي المحولين ، عند توصيلهما على التوازي معا ، حيث :

$$\dot{Z}_{12} = \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = R_{12} + jX_{12}$$

نعتبر وجود محول واحد بهذه المعاوقة المكافئة ، يكون الضغط على طرفي ملفه الثانوى فى الحالة المثالية هو V' ، وهو يناظر القوة الدافعة الكهربائية المرحلية E_0 ، بالنسبة للبولد . نستطيع فى هذه الحالة استخدام المعادلة (٧-٤) ، الخاصة بالمولدات ، صفحة ١٨١ ، للحصول على V_1 ، باعتبارها مناظرة للضغط المرحلى على أطراف المولد V ، وباعتبار R_{12} تناظر R_a ، كما أن X_{12} تناظر X_s ويكون P و Q هما مركبتا الحل المعطى ، بضرب الـ KVA فى $\sin \phi$ ، $\cos \phi$.
أما إذا لم تكن $V_1 = V_2$ ، فإننا نستطيع حل المسألة ، بنفس الطريقة ، على أساس أن $V_1 = V_2$ ، وكلا منها تساوى الضغط الأصغر ، ثم نقوم بعملية تجميع لكل تيار ، مع نظيره من التيارين I_{10} ، I_{20} ، على نفس النمط ، كما فعلنا فى حالة المولدات ، بالاشارة إلى شكل (٦-٤ د) ، صفحة ١٩٠ .

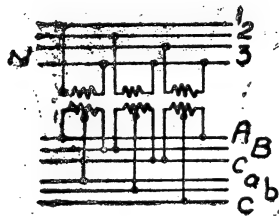
مسائل على الباب الثامن

- 1 - Three 1 — phase transformers connected in mesh supply 100 A per line to a 3 — phase, 3 — wire system. (a) what is the current in each transformer? one unit develops a fault and is removed : (b) by how much is the capacity of the set reduced for the same temperature — rise ? (c) find the current in

each of the remaining transformers if the line current corresponds to the rating in (b).

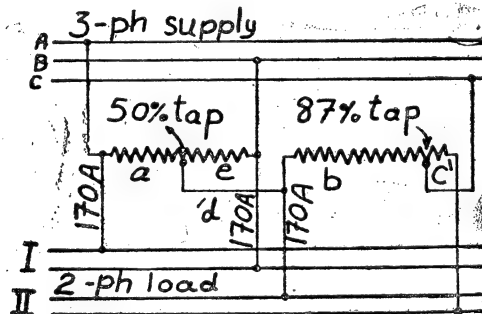
- 2 — A 3 - phase, step - down transformer is connected to 6600 V mains, and takes 10 A. Calculate the secondary line voltage, line current and output for the following connections ; (a) mesh/mesh, (b) star/star, (c) mesh/star, (d) star/mesh. The ratio of turns per phase is 12. Neglect losses.
- 3 — A lighting load of 1 amperes is taken from one phase of a 3 - phase transformer bank. Find the current distribution in the phases and in the lines (a) when the transformers are connected mesh/mesh, (b) When the primary side is connected in star (3 - wire) and the secondary in mesh, and (c) When both sides are connected in V or open -delta.
- 4 — Derive an expression for the approximate relative weights of copper in an auto - transformer and a 2 - winding transformer, the primary voltage being V_1 and the secondary voltage V_2 . Compare the weights of copper when the transformation ratio is 3. Ignore the magnetising current.
- 5 — Find the values of the currents flowing in the various branches of a 3 - phase, star - connected auto - transformer loaded with 500 KW at power factor 0.8 lagging, and having a ratio of 440/500 V. Neglect voltage drops and all losses in the transformer, also the magnetising current.
- 6 — Mid - points of the secondaries of a bank of 4000/

440 V transformers are used to provide a lower voltage, as shown in the diagram. Find (a) the voltage



of the bus - bars abc and (b) the currents in the transformer secondaries when currents of 100 A at unity power factor are taken from each of the two sets of low voltage bus - bars abc and ABC.

- 7 — Two 1 - phase auto - transformers are scott - connected and loaded as shown in the diagram. Determine the



currents in the parts a, b, c, d, e and the 3 - phase load current. Draw a schematic diagram showing the current directions in all circuits.

- 8 — Two 100 — KVA, 1 — phase transformers are connected in parallel on both primary and secondary

sides . One transformer has an ohmic drop of 0.5 % and a reactive drop of 8 % of the voltage on full load. The other has corresponding drops of 0.75 % and 4 % respectively. How will the following total loads be shared ? (a) 180 KW at 0.9 lagging power factor, (b) 120 KW at 0.6 lagging power factor, (c) 200 KW at unity power factor.

9 — The short - circuit tests of two, 1 - phase, 3300/220 V transformers are as follows :

A — primary voltage, 100 V, secondary current, 2.0 A, power, 600 W.

B — primary voltage, 80 V , secondary current 230 A , power, 1100 W.

The transformers are run in parallel on the same primary and secondary bus - bars, and carry a total load (input) of 100 KW at 0.8 power factor (lagging) Find the approximate primary load currents, power factors, and power distribution between the two transformers.

10 — Two 1 - phase transformers, A and B are connected in parallel to supply a load having a resistance of 5 Ω and an inductive reactance of 2 Ω . The equivalent resistances referred to the secondary windings are 0.25 Ω and 0.3 Ω and the equivalent reactances are 1.5 Ω and 2 Ω respectively. The open - circuit secondary voltages are in the ratio 100 : 98 . Calculate the inductive reactance which, when connected in series with the secondary of transformer B, will cause the

magnitudes of the currents delivered by A and B to be in the ratio of 1.8 : 1

- 11 — The ratio of the numbers of turns per phase in the primary, secondary, and tertiary windings of a transformer is 10 : 2 : 1 with lagging currents of 45 A at power factor 0.8 in the secondary, and 50 A at power factor 0.71 in the tertiary winding, find the primary current and power factor,
- 12 — Explain why a star-delta transformer, and a star-star transformer, having the same transformation ratio between primary line voltage and secondary line voltage may not be operated in parallel.
- (b) sketch a circuit diagram for three-to-two phase conversion by the scott system, and explain the principles involved. If the two - phase output is balanced at 50 KVA per phase at 300 volts, and the three - phase input is at 6.6 KV, determine the current and voltage relevant to each winding of each transformer. Ignore all transformer imperfections and sketch the vector diagram.
- 13 — An 82 KVA, 6600/400 V, 50 c/s, single phase transformer has a power input of 1000 W when tested on no load at rated voltage. When the low voltage side is short circuited and 100 V applied to the primary side, it takes a current of 5.5 amps and a power of 300 W. Calculate the efficiency and percentage regulation at full load, 0.8 power factor lagging.

If the above transformer is connected in parallel with a 110 KVA, 6600/400 V transformer which has a percentage

reactance of 3.6 and a percentage resistance of 1.1, find how they share a load of 140 KVA at 0.8 power factor lagging.

14 — Two single phase transformers supply, in parallel, a secondary load of 1000 A at 0.8 power factor lagging. For each transformer the secondary, E.M.F on open circuit is 3300 V, and the total leakage impedances, in terms of the secondary, are $0.1 + j 0.2$ and $0.05 + j 0.4$ ohm respectively. Determine the output current for each transformer, and the ratio of the KW output of the two transformers.

15 — Describe and prove how two transformers, having impedances of Z_1 and Z_2 , share a total load of I amps, the two transformers having equal voltage ratios.

Two 100 K.V.A., 1—phase transformers are connected in parallel on both primary and secondary sides. One transformer has an ohmic drop of 0.5 % and a reactive drop of 8 % of the voltage on full load. The other has corresponding drops of 0.75 % and 4 % respectively. How will they share a total load of 180 K.W. at 0.9 power factor lagging and what will be the power factor of the current in each transformer?

16 — Two transformers are connected with primaries in parallel to a 1000 V supply and with their secondaries in parallel to a one ohm impedance having an inductive reactance of 0.6 ohm.

Calculate the primary current of each transformer in magnitude

and phase if one transformer has a turns ratio of 10, a leakage reactance referred to the secondary of 0.6 ohm and a resistance referred to the secondary of 0.2 ohm. The corresponding values for the other transformer are 9.8, 0.07 and 0.03 respectively. The magnetising currents may be neglected.

الباب التاسع

بعض المشاكل الهامة في المحولات واختباراتها

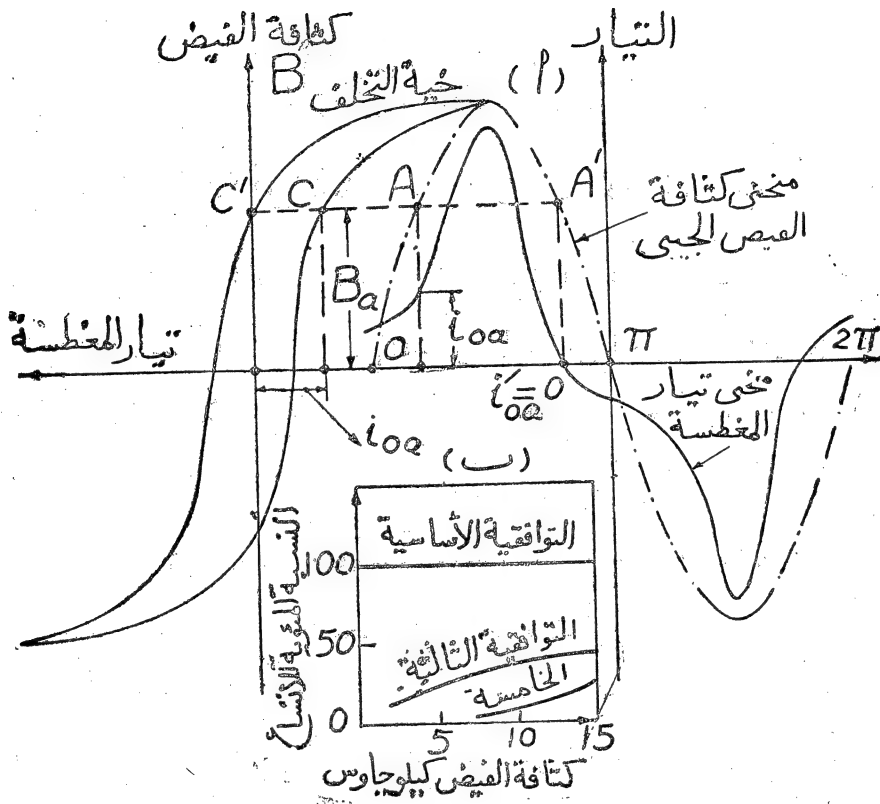
(Some special problems and testing of transformers)

نبدأ في هذا الباب بدراسة أهم المشاكل الخاصة في المحولات ، وهى التى تؤثر عادة على ملامح التصميم ، وذلك حتى نكون على بينة من أمرها عند دراسة طرق التصميم .

أولا - التوافقيات في المحولات (Harmonics in transformers) :

سبق الفرض في دراستنا للمحولات أن ضغط الينبوع ، الموصل إلى الملف الابتدائي ، يكون متغيرا على منحنى جيبي ، بحيث ينتج فيض مغناطيسى ، في القلب الحديدى ، يتغير هو الآخر ، تبعا لذلك ، على منحنى جيبي أيضا . وقد حان الوقت لأن نسأل أنفسنا ، كيف يكون شكل منحنى تيار المغنطة ، في هذه الحالة ، باعتبار أن التشبع المغناطيسى واقع ، بالنسبة لخطوط القوى المغناطيسية في القلب الحديدى ، لا محالة .

يمكن رسم منحنى تيار المغنطة باستخدام منحنى التفطس ، بدورته الكاملة ، مع أخذ التخلف المغناطيسى في الاعتبار ، ومنحنى كثافة الفيض المغناطيسى في القلب الحديدى ، الذى يتغير على شكل جيبي ، كما هو مبين في شكل (١ - ٩) . للحصول على قيمة تيار المغنطة i_{02} ، عند نقطة على منحنى التيار مثل g مثلا ، نحدد قيمة كثافة الفيض المغناطيسى B_a (النقطة A على المنحنى الجيبي الخاص بكثافة الفيض) ، ومنها يمكن تحديد النقطة c على منحنى التفطس ، ثم قيمة



شكل (١ - ٩)

تيار المغنطة i_{oa} ، كما هو موضح بالنجمات الأسهم في الشكل . ويلاحظ أن هناك قيمتين للتيار i_{oa} و i'_{oa} مع نفس قيمة كثافة الفيض B_a ، وهما مختلفتان بسبب التخلف المغناطيسي . وينشأ عن الانحناء ، الناتج من ظاهرة التشبع ، في منحنى المغنطة ، أن يختلف مجرى منحنى تيار المغنطة عن الشكل الجيبي ، كما أن قيمة النهاية العظمى له ترتفع بصورة حادة ، كلما زاد دخوله في منطقة التشبع . وبعمل تحليل فوريير لمثل هذا التيار ، نجد أنه يحتوي ، علاوة على التوافقية الأساسية ، على توافقية ثالثة بارزة ، كما أنه قد يحتوي على توافقية خامسة أيضا . وتزداد

قيمة اتساع كل من هذه التوافقيات بالنسبة للتوافقية الأساسية ، كلما ازدادت قيمة كثافة الخطوط المغناطيسية في القلب الحديدي ، أى كلما ازداد الدخول في منطقة التشبع ، كما هو مبين في شكل (٩ - ب) ، وكما يتضح من الجدول الآتي :

كثافة الفيض جاوس	النسبة بين الإتساعين			
	التوافقية التاسعة	السابعة	الخامسة	الثالثة
	النسبة الأساسية	النسبة الأساسية	النسبة الأساسية	النسبة الأساسية
10000	0.009	0.011	0.050	-0.162
12000	0.010	-0.013	0.094	-0.287
14000	0.062	-0.113	0.267	-0.528
16000	0.031	-0.121	0.331	-0.658
18000	-0.018	-0.053	0.275	-0.658

ونظراً لأن التوافقية الثالثة هي أبرز هذه التوافقيات ، فسوف ندرس تأثير وجودها على خواص معينة للمحول ، وذلك في الحالات المختلفة ، مع اعتبار أن شكل موجة ضغط الينبوع يكون جيدياً ، وأن هبوط الضغط في المحول يكون صغيراً نسبياً ، مما يستلزم الأخذ بمبدأ كون منحني القوة الدافعة الكهربائية على طرفي الملف الابتدائي ذا شكل جيبي ، حتى يمكن أن يتعادل مع ضغط الينبوع* .

* وقد يتسبب مرور تيار المغنطة ، الذي يختلف منحناه عن الشكل =

١ - في حالة المحول مفرد المرحلة :

نظرا لخلو منحنى ضغط الينبوع من توافقية ثالثة ، كما فرضنا ، فإن تمرير توافقية التيار الثالثة في المحول ، يستدعى وجود توافقية ضغط ثالثة في منحنى القوة الدافعة الكهربائية ، ناشئة عن توافقية فيض مغناطيسى ثالثة ، مما يستدعى الاخذ بمبدأ وجود تشويه في منحنى الفيض المغناطيسى الجيبى ، على عكس ما فرضناه في البداية . هذا ويجب أن تكون توافقية الضغط الثالثة هذه قادرة على تمرير توافقية التيار الثالثة في الملف الابتدائى للمحول والينبوع ، من ناحية ، ثم في الملف الثانوى ومعاوقة الحمل من الناحية الأخرى . وعلى العموم فإنه إذا أمكن تصغير المعاوقة ، التى تقابلها التوافقية الثالثة للتيار ، إلى درجة كبيرة ، فإن توافقية الضغط الثالثة ، المطلوبة في منحنى القوة الدافعة الكهربائية ، سوف تصبح صغيرة جدا ، مما يجعلنا نعتبرها مهملة ، ونجتاز ، في هذه الحالة ، عن وجود تشويه في منحنى الفيض المغناطيسى ، الذى اعتبرناه جيبيا ، بسبب وجود التوافقية الثالثة للتيار . وينصب هذا الكلام أيضا ، بطبيعة الحال ، على أية توافقية أخرى ، بأية درجة .

٢ - في حالة المحول ثلاثى المراحل :

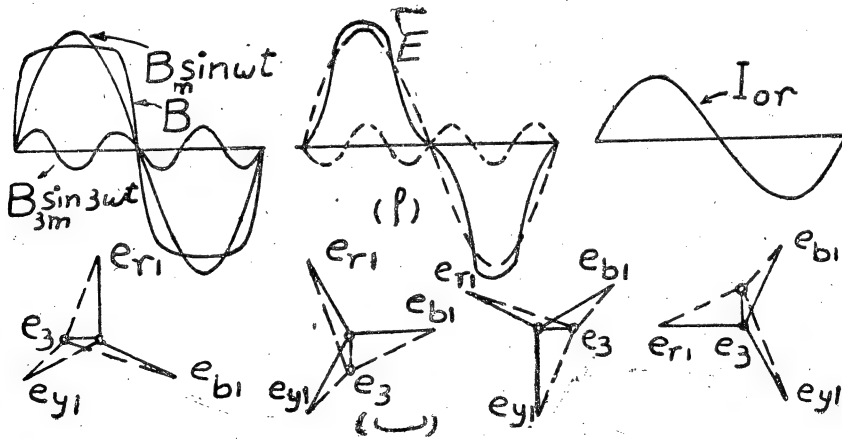
يجب التفرقة ، في هذه الحالة ، بين ثلاثة محولات ، كل منها مفرد المرحلة ،

الجيبى ، في عانة التزامن للبولد ، وعانة الخط الواصل بين المولد والمحول ، في عمل مربوط ضغط ، يودى طرحه من القوة الدافعة الكهربائية للبولد ، ذات الشكل الجيبى ، إلى إعطاء منحنى ضغط طرفى للبولد ، وهو الضغط على الملف الابتدائى ، يختلف عن الشكل الجيبى . ويتوقف مقدار التشويه في منحنى الضغط ، في هذه الحالة ، على مقدار التشويه في تيار المغنطة .

موصلة معا للحصول على المحول الثلاثي ، ومحول واحد ثلاثي المراحل ، بطبيعته .
 في الحالة الاولى تكون الدائرة المغناطيسية للدحولات الثلاثة منفصلة عن بعضها
 البعض تمام الانفصال ، بينما تكون الدوائر المغناطيسية للمراحل الثلاث متشابكة
 معاً ، على قلب حديدى مشترك ، في الحالة الثانية . هذا وتكون الدوائر الكهربائية
 للمراحل الثلاث متشابكة معاً في الحالتين .

مسوف نفترض في كل ما يأتى أن منحنى ضغط الينبوع ذو شكل جيبي ، في
 المراحل الثلاث ، وأن الاحمال متزنة ، ويكون توصيل مراحل الينبوع والاحمال
 نجمة دائماً ، بينما تختلف الأمور ، من حالة إلى حالة ، تبعاً لطريقة توصيل
 مراحل المحول نفسه على الجانبين ، الابتدائي والثانوى . نبدأ أولاً بثلاثة محولات
 مفردة المرحلة :

أ — عندما تكون المحولات موصلة دلتا/دلتا : تكون ضغوط التوافقيات
 الثالثة ، في المراحل الثلاث ، في اتفاق مرحلى معاً ، فتعمل على تمرير تيار



شكل (٢) (٩)

التوافقية الثالثة داخل الدلتا . ويمتص هبوط الضغط ، الناشئ عن مرور هذا التيار ، توافقية الضغط الثالثة في كل مرحلة ، فلا تظهر توافقيات الضغط الثالثة في الضغوط الخطية (راجع من صفحة ٧٦ إلى صفحة ٧٩) . وبذلك نجد أن منحنى كل من الضغط والتيار الابتدائيين يكون جيبي الشكل ، كما أن منحنى الفيض المغناطيسي يكون أقرب ما يمكن إلى الشكل الجيبي ، في حين تمر توافقيات التيار الثالثة داخل الدلتا ، ولا تؤثر على الضغوط الخطية .

ب — عندما تكون المحولات موصلة نجمة/دلتا أو دلتا/نجمة ، بدون خط

تعادل : عند عدم وجود خط تعادل نحصل على نفس السلوك ، في هذه الحالة ، مثل الحالة السابقة . غاية ما في الأمر أن وجود الدلتا ، على ناحية واحدة فقط ، يؤدي إلى زيادة في قيمة المعاوقة ، التي تقابلها توافقية التيار الثالثة ، أثناء مرورها حول هذه الدلتا ، مما يؤدي إلى ضرورة زيادة التشويه في الشكل الجيبي ، لمنحنى الفيض المغناطيسي ، في هذه الحالة ، عن الحالة السابقة .

ج — عندما تكون المحولات موصلة نجمة/نجمة ، بدون خط تعادل :

تتعادل توافقيات الضغط الثالثة ، لتوافقها مرحليا معا ، بالنسبة لكل مرحلتين ، فلا تظهر في الضغوط الخطية ، كما يتعذر بذلك مرور تيار التوافقية الثالثة ، فتتعدر عملية التعويض ، السابق شرحها ، التي تعمل على الاحتفاظ بمنحنى الفيض المغناطيسي أقرب ما يمكن إلى الشكل الجيبي . لذلك يكون تيار المغنطة ذا شكل جيبي ، بينما يختلف منحنى الفيض المغناطيسي ، في هذه الحالة ، عن الشكل الجيبي ، فيصبح مسطحا عند القمة ، ونحصل على منحنى حاد القمة للقوة الدافعة الكهربائية ، كما هو مبين في شكل (٢ — ٩) . ويكون هناك توازن إذا بين ضغط الينبوع

والقوة الدافعة الكهربائية ، بالنسبة للخطوط ، بينما ينعكس هذا التوازن بالنسبة للمراحل ، مما يؤدي إلى عدم استقرار ضغط نقطة التعادل عند قيمة معينة ، وتذبذبها بين قيم مختلفة ، نتيجة لتغير قيم الضغوط المرحلية ، كما هو مبين في شكل (٢-٩ ب) . تبين المتجهات e_{b1} و e_{y1} و e_{r1} ، في هذا الشكل ، القوى الدافعة الكهربائية المتوازنة ، في المراحل الثلاث ، بالنسبة للتوافقية الأساسية ، بينما تبين المتجه e_0 القوى الدافعة الكهربائية المتفقة مرحليا ، في المراحل الثلاث ، بالنسبة للتوافقية الثالثة ، وذلك في أربع لحظات مختلفة متتالية . ويؤدي جمع التوافقية الأساسية مع التوافقية الثالثة ، في كل مرحلة ، إلى إعطاء الضغط على طرفي ملف هذه المرحلة ، كما هو مبين بالخطوط المتقطعة .

د — عندما تكون المحولات موصلة بنجمة/نجمة ، مع وجود خطي تعادل على الناحيتين : يؤدي وجود خط التعادل ، في كل ناحية ، إلى وجود مسار لمرور تيارات التوافقية الثالثة ، في اتفاق مرحلي ، في هذين الخطين ، على الجانبين ، فتصبح هذه الحالة عاكسة للحالة أ تماما .

ه — عند وجود ملفات ثالثة موصلة دلتا : يمكن في هذه الحالة استخدام أية طريقة من طرق التوصيل السابقة ، مع الاطمئنان بوجود المسار اللازم ، أو جزء منه ، لتيارات التوافقية الثالثة ، والحصول على منحني للفيض المغناطيسي أقرب ما يمكن إلى الشكل الجيبي ، في أية حالة منها .

بالنسبة للمحول ثلاثي المراحل ، القائم بذاته ، يتوقف الأمر على تكوين القلب الحديدي ، لذلك يجب أن نفرق بين الأنواع الثلاثة المعروفة ، كما يأتي :

أ — في حالة المحول الهيكلي (shell type transformer) : نجد أن

الدوائر المغناطيسية للمراحل الثلاث مستقلة عن بعضها البعض ، كما هو الحال في المحولات مفردة المرحلة ، عند توصيلها لتكوين محول ثلاثي المراحل . لذلك ينصب عليها جميع ما سبق شرجه بالنسبة لهذه المحولات من أ إلى هـ .

ب - في حالة المحول ذي القلب الحديدي (core type transformer)

نجد أن توافقيات الفيوض ذات الدرجة الثالثة تكون ذات إتجاه واحد في السيقان الثلاثة ، مما يؤدي إلى أن كلامها لا يحدد مساراً للرجوع في أى من الساقين الآخرين ، فيتخذ مساره في الهواء (أو الزيت) ، أو في أى أجزاء حديدية منه ، مثل جدران الصهريج (Tank) ، الذى يحتوى على المحول . وينتج عن ذلك الحد من قيمة هذه الفيوض ، نظراً لزيادة المعاوقة المغناطيسية في مساراتها ، مما ينحو بمنحنى الفيض المغناطيسى ، والقوة الدافعة الكهربائية ، نحو الشكل الجبى ، في هذه الحالة . وقد وجد أن مسار الفيوض ذات الدرجة الثالثة في جدران الصهريج يتسبب عنه حدوث مفقودات حديدية في هذه الجدران ، كما أنه يمكن زيادة الحد من قيمة هذه الفيوض ، باستخدام حلقة من النحاس تحيط بالمحول ، فتعمل للتيارات التى تنتجها الفيوض في الحلقة على ملامشتها .

وتتلخص مساوئ وجود توافقيات التيار في المحولات في مفقودات النحاس الزائدة التى تنشأ عنها ، وكذلك مفقودات الحديد التى سبقت الإشارة إليها ، وفي القلب الحديدي نفسه . كما يحتتمل حدوث تداخل مغناطيسى بينها وبين دوائر الاتصالات السلكية يؤثر على هذه الدوائر تأثيراً غير مرغوب فيه . أما مساوئ توافقيات الضغط في المحولات ، فهى أنها تسبب في زيادة الاجهادات الكهربائية في المواد العازلة ، كما أنها تحدث تداخلاً كهرواستاتيكيًا مع دوائر الاتصالات السلكية ، مما يؤثر على هذه الدوائر تأثيراً سيئاً هذا علاوة على أنه قد يحدث

ونين بالنسبة لتردد هذه الضغوط مع تردد الدائرة، التي تحتوى على معامل الحث الذاتي للملفات المحول، والسعة الخاصة بخط التغذية المتصل به .

ثانيا - المتلاشيات (Transients) :

دأبنا في دراستنا السابقة على الاهتمام بحالات الدوام (steady state) فقط ، والأشارة إلى حالات التلاشى (Transient condition) كلما دعا الأمر إلى ذلك ، عند الانتقال من حالة دوام إلى أخرى ، بحيث يظهر تأثير حالة التلاشى المتوسطة في حالة الدوام اللاحقة ، كما حدث عند شرح اوزان الآلات المتزامنة . ولكننا قد نحتاج في بعض الأحوال إلى الاهتمام بحالات التلاشى ، التي تسبق عادة حالات الدوام ، بسبب ما يمكن أن يحدث في أثناءها ، مما قد يعرض بعض الأجهزة للخطر ، مثل زيادة التيار بصورة تزيد من خطر سخونته على بعض الأجزاء في هذه الأجهزة ، أو ارتفاع الضغط بصورة مفاجئة ، تشكل خطرا على المواد العازلة . وينصب هذا على حالات التلاشى في المحولات ، التي يمكن تقسيمها إلى نوعين ، يمكن التمييز بينهما ، وهما حالات تلاشى التيار ، وحالات تلاشى الضغط .

١ - تلاشى التيار في المحولات :

(current transients in transformers)

تحدث حالة تلاشى للتيار في المحول ، تستدعى الاهتمام ، عند توصيل الملف الابتدائي إلى الينبوع ، بينما يكون الملف الثانوي مفتوحا (open circuited) . ويختلف مدى الخطورة في هذه الحالة على موضع الضغط اللحظي (instantaneous voltage) في دورة الضغط الابتدائي (primary voltage cycle) عند توصيل المحول على الينبوع . ويوجد ، على هذا الأساس ، حالتان متطرفتان

(two extreme conditions) ، نبحث كل منهما على حدة :

أ — التوصيل عندما يكون ضغط الينبوع مارا بقيمة النهاية العظمى له :

هذا يعنى أن القوة الدافعة الكهربائية يجب أن تتواجد بقيمة النهاية العظمى لها أيضا ، لمعادلة ضغط الينبوع (باعتبار أننا نهمل هبوط الضغط في المقاومة وبما أن التسرب للمحول في هذه الحالة) ، مما يستدعى وجود النهاية العظمى لمعدل تغير خطوط القوى المغناطيسية في القلب الحديدي ، في نفس اللحظة . وبمراجعة منحنيات ضغط الينبوع ، مع القوة الدافعة الكهربائية ، والفيض المغناطيسى في القلب الحديدي للمحول ، في حالة الدوام ، شكل (٣ — ١٩) نجد أن الأمور تكون مستتبة ، في حالة الدوام ، على الأوضاع المطلوب توافرها في لحظة التوصيل ، مما يجعل المحول يدخل في حالة الدوام مباشرة ، دون أية حاجة إلى حالة ثلاثى ، تمهد له السبيل إليها .

ب — التوصيل عندما يكون ضغط الينبوع مارا بقيمة الصفر : يجب أن

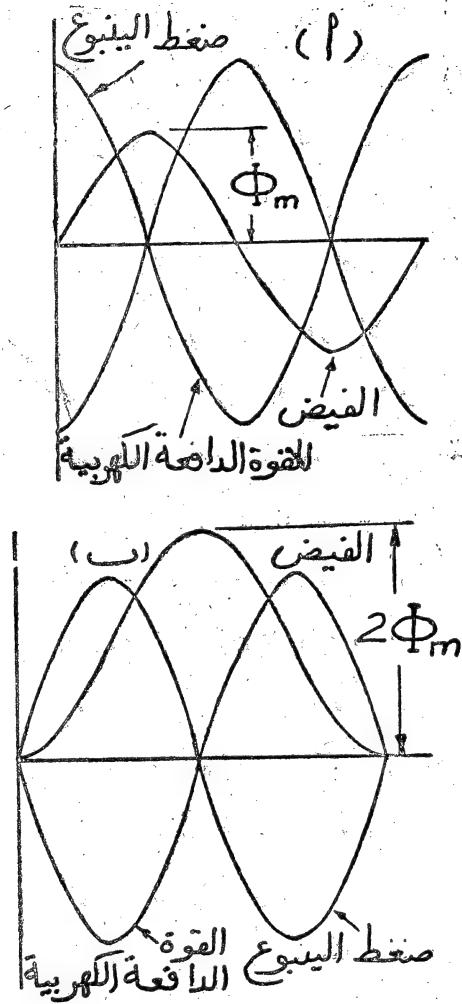
تبدأ القوة الدافعة الكهربائية المضادة ، التى تنشأ لمعادلة ضغط الينبوع ، بقيمة الصفر ، وتزداد قيمتها السالبة ، تبعاً لزيادة قيمة ضغط الينبوع الموجب ، حتى يصلها إلى قيمة النهاية العظمى ، كما هو مبين في شكل (٣ — ١٩) . وتطبيقاً

لقانون التأثير الكهرومغناطيسى $(10^{-8} \times N \frac{d\phi}{dt} = e)$ ، هندسة

الآلات الكهربائية صفحة ١٠٢) يجب أن يبدأ الفيض المغناطيسى في القلب

الحديدي للمحول ، في هذه الحالة ، بحيث يكون $\frac{d\phi}{dt}$ يساوى صفراً ، و ϕ

أيضا يساوى صفراً ، ثم تزداد قيمة $\frac{d\phi}{dt}$ حتى تصل إلى أقصى قيمة لها ،



شكل (٣-٩)

عندما يصل الضغط والقوة الدافعة الكهربائية إلى قيمة النهاية العظمى لها ، بعد ربع دورة . وفي ربع دورة التالي تقل قيمة $\frac{d\Phi}{dt}$ ، مع استمرار الزيادة في قيمة Φ ، حتى يصل الضغط والقوة الدافعة الكهربائية إلى قيمة الصفر مرة أخرى ؛ حيث تكون

ϕ قد وصلت إلى أقصى قيمة لها ، و $\frac{d\phi}{dt}$ قد وصلت إلى قيمة الصفر مرة أخرى . وبتتبع سير الأحداث ، على هذا النحو ، في شكل (٣-٩) ، نجد أن قيمة الفيض المغناطيسى ، في القلب الحديدي للمحول ، تصل إلى ضعف قيمة النهاية العظمى لها في حالة الدوام ϕ_m ، التى حصلنا عليها في شكل (٣-٩) ، وذلك بعد نصف دورة من بداية حالة الثلاثى ، التى تصاحب التوصيل إلى الينبوع . ويقال إننا نحصل على تأثير تضاعفى (doubling effect) في هذه الحالة . ونظراً لحالة التشبع الهائلة ، التى يصل اليها القلب الحديدي ، عند هذه القيمة الكبيرة جداً للفيض المغناطيسى ، فانه بينما يكون تيار التمتعطس ، في الأحوال العادية للمحول ، حوالى من 5 % إلى 10 % من تيار الحمل الكامل ، قد تصل قيمة تيار التمتعطس ، في هذه الحالة ، إلى عدة مرات من قيمة تيار الحمل الكامل . وعلى العموم تعمل مقاومة الملفات ، وممانعة التسرب لها ، بما تسببه من هبوط كبير في الضغط ، مع مرور التيارات الكبيرة ، وكذلك مفقودات النحاس ومفقودات الحديد ، المصاحبة لهذه الظواهر كلها ، على الحد من قيمة الفيض المغناطيسى ، فلا يصل إلى ضعف القيمة بالضبط ، بل أقل من ذلك ، والحد من قيمة تيار الثلاثى ، الذى يمر عند توصيل المحول إلى الينبوع . كذلك لا يجب أن نتوقع دائماً أسوأ الاحتمالات ، إذ يندر ، في الغالب ، أن يكون توصيل المحول إلى الينبوع في اللحظة التى يمر بها الضغط بقيمة الصفر بالضبط ، وإنما الاحتمال الأكبر أن تقع قيمة الضغط بين الصفر والنهاية العظمى ، مما يجعلنا نحصل على قيمة محتملة لتيار الثلاثى ، رغماً عن كبرها . وعلى العموم يجب على المصمم أن يعد نفسه لجميع الاحتمالات . وإن أسوأ ما فى الأمر ، فى الواقع ، أن يكون فى القلب الحديدي للمحول كمية من المغناطيسية المتبقية ، التى تعطى فيضاً مغناطيسياً

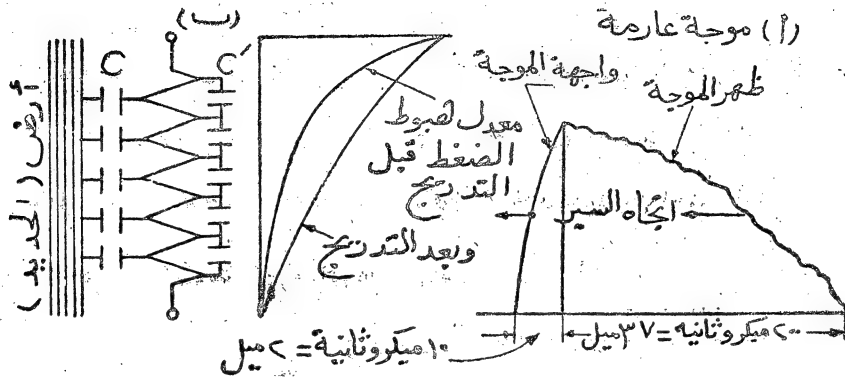
في نفس اتجاه الفيض المغناطيسي الناشئ في فترة الثلاثى . هذا ويمكن تدبير الوقاية من تيارات الثلاثى الخطرة ، التى يمكن أن تصاحب توصيل المحول إلى الينبوع ، بوضع مقيم التيار الزائد (over - current relay) فى الدائرة ، وهو يعمل على منع توصيل المحول ، عند مرور أى تيار يزيد عن الحد المأمون .

٢ - الضغوط العارمة لى المحولات :

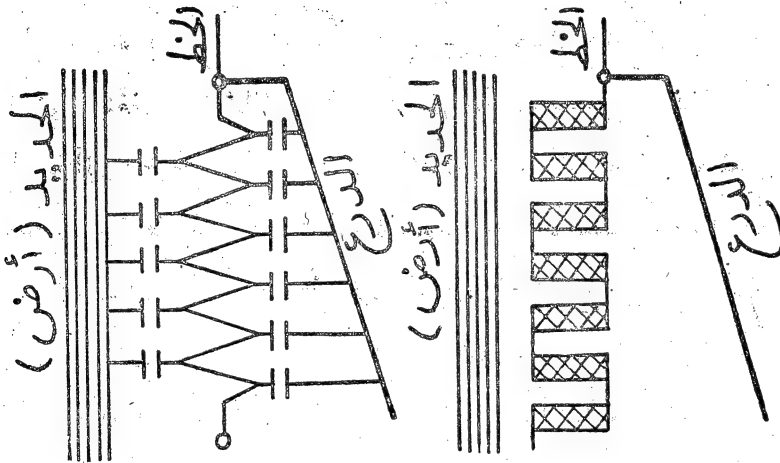
(Surge voltages in transformers) :

تتعرض المحولات ، الموصلة على أطراف خطوط النقل الكهربائية ، لموجات من الضغوط العارمة ، التى تنشأ فى هذه الخطوط ، ثم تنتقل بسرعة الضوء إلى أطرافها ، حيث تنتشر على ملفات الضغط العالي للمحول ، متسببة فى وجود حالة ثلاثى ، يتغير فى أثناءها توزيع الضغط على هذه الملفات ، بمعدلات قد ينجم عن علوها آثار وخيمة العواقب بالنسبة للمحول . وقد تنشأ موجات الضغط العارمة هذه فى الخطوط الكهربائية عند قفل مفاتيح التزامن ، أو بسبب الأخطاء (faults) التى تحدث فيها ، أو بفعل الظروف الجوية ، مثل تفريغ البرق الكهربائى . ويتركز خطر هذه الموجات فى أنها تمتلك عادة واجهة شديدة الانحدار (steep wave front) ، قد يبلغ معدل تغير الضغط فيها عدة مئات من المرات مثل معدل الضغط العادى ، كما يتضح من منحنى إحدى هذه الموجات ، المبين فى شكل (٤ - ٩) .

يكون توزيع ضغط مثل هذه الموجات العارمة على ملفات المحول ، على حسب السعة بين كل منها والأرض c ، والسعة بين بعضها البعض c' شكل (٤ - ٩ ب) ، وليس على حسب المقاومة أو الممانعة الحثية ، وذلك نتيجة لمعدل تغيرها الكبير ، الذى يجعل ممانعة المكثف صغيرة جداً بالنسبة للمقاومة أو الممانعة الحثية . هذا



شكل (٩-٤)



شكل (٩-٥)

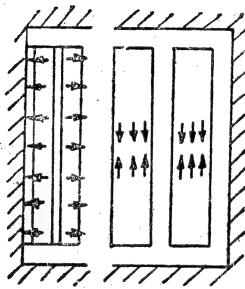
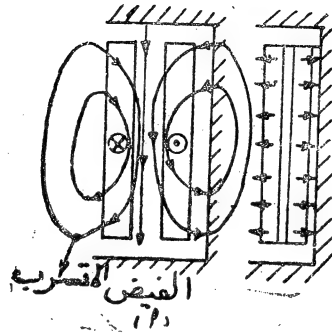
كما أن توزيع الضغط لا يكون متساويا على الملفات ، لنفس السبب ، فيكون نصيب الملفات الطرفية (end coils) كبيرا ، بينما يتضاءل الضغط على باقي الملفات ، كما هو واضح من منحنى توزيع الضغط على الملفات ، المبين في شكل (٩-٥ ب) وقد يتسبب وجود الضغط العالي ، بدرجة غير طبيعية ، على الملفات

الطرفية ، في أثناء فترة الثلاثي ، التي تصاحب قدوم موجة الضغط العارمة ، حتى يتم تخميدها ، في انهيار عازل هذه الملفات ، ونشوء دائرة قصر . ويمكن تدبير الوقاية من اخطار موجات الضغط العارمة بتقوية عزل الملفات الطرفية (حوالي 5 % من الملفات) ، بحيث يمكن أن تتحمل هذه الضغوط غير العادية ، ثم باستخدام وسائل الوقاية ، التي تعمل على امتصاص الطاقة الموجودة في الموجة العارمة ، وتخميدها ، مع العمل على تسربها إلى الأرض . كذلك يمكن مساواة التوزيع في الضغط (تدرج الضغط) على الملفات ، على طول ملف الضغط للعالي ، في محولات القلب ، التي تستخدم فيها ملفات اسطوانية ، باستخدام درع معدني ، (metallic shield) ، تعمل سعته مع الملفات على معادلة سعته مع الأرض ، كما هو مبين في شكل (٥-٩) .

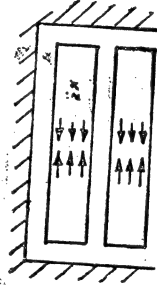
لنا : القوى الميكانيكية المؤثرة على الملفات :

(Mechanical forces acting on coils) :

سبق أن بيّنا أنه عند تحميل المحول يكون تيار الحمل في الملف الثانوي ، ومركبة التيار ، التي تسري بسببها في الملف الابتدائي ، في اتجاهين متضادين ، مما يؤدي إلى إعطاء قوتين دافعتين مغناطيسيتين متعادلتين ، من الملفين ، وذلك بالنسبة للفيض المغناطيسي في القلب الحديدي . أما بالنسبة للحيز الموجود بين الملفين ، وهو ما يكون الجزء الرئيس في مسارات تسرب الفيض (paths of leakage flux) ، فإننا نجد أن هاتين القوتين الدافعتين المغناطيسيتين تعطيان فيضاً مغناطيسياً في نفس الاتجاه ، وهذا هو الفيض المتسرب ، الذي يتسلسل (links) جزء منه مع أحد الملفين فقط ، ويتسلسل الجزء الآخر مع الملف الآخر ، فقط ، أيضاً . شكل (٦-٩ أ) . ويكون نتيجة هذا التسلسل الجزئي للفيض ، مع أحد الملفين



(ب)

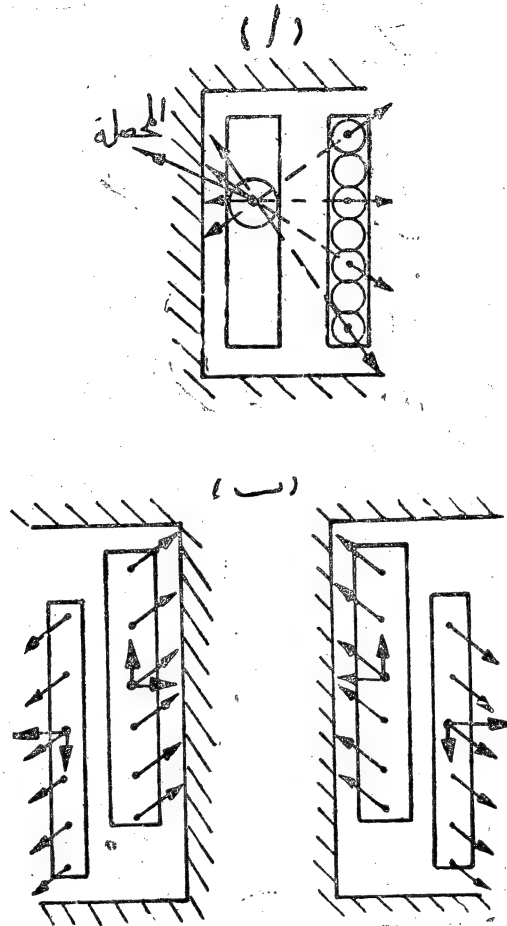


(ج)

شكل (٦-٩)

فقط ، ظهور ممانعة التسرب لهذا الملف ، كما سنشرح بالتفصيل فيما بعد ، وعلاوة على ذلك ينتج عن وجود القوتين المغناطيسيتين المتضادتين ، الملفين الابتدائي والثانوي ، قوى ميكانيكية تؤثر عليهما ، وقد تسبب في تمزيقهما ، عندما يزداد التيار بصورة كبيرة ، في حالة وجود دائرة قصر على المحول ، إذا كان ضخما .

تنوقف اتجاهات القوى ، المؤثرة على الملفات ، على اتجاهات التيارات في أجزائها المختلفة . ويمكن ، بناء على ذلك ، التمييز بين حالتين أساسيتين ، وهما عندما يكون ملف الضغط العالي والمنخفض متساويين في الطول ، وهي حالة التماثل (symmetry) بينهما ، وعندما يكون الملفان غير متساويين في الطول ، وهي



شكل (٧ - ٩)

حالة عدم التماثل (dissymmetry) بينهما .

١ - حالة التماثل : ونجد فيها نوعين من القوى التي تؤثر على الملفات ،

وهي :

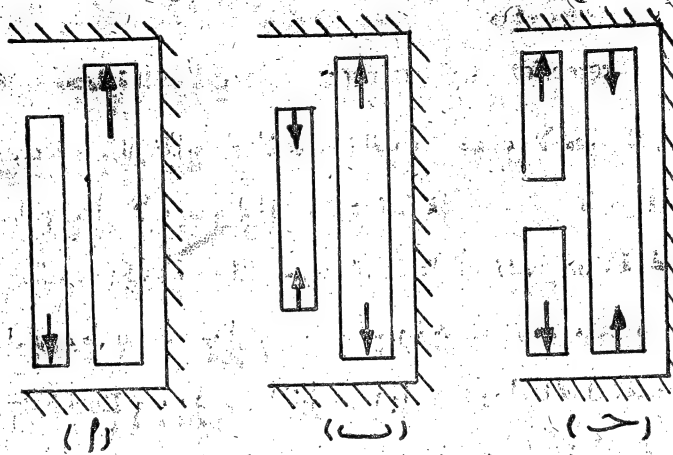
أ - توجد بين موصلات الضغط العالي وموصلات الضغط المنخفض ، التي تقع في نفس المستوى الأفقي قوى تنافر بسبب اختلاف اتجاه التيار فيها (شكل

(٨-٢) كتاب هندسة الآلات الكهربائية . ويمكن حساب قوى التنافر هذه على أساس المعادلات التي استخدمناها لحساب قيمة القوة بين موصلين يحملان تيارين مختلفي الإتجاه (هندسة الآلات الكهربائية صفحة ٥٦ - ٥٨) . هذا وتؤثر قوى التنافر على الملف الداخلي ضاغطة عليه في اتجاه القلب الحديدي ، بينما تؤثر على الملف الخارجي ضاغطة عليه ناحية الخارج ، محاولة تكبير قطره ، كما يتبين من شكل (٦-٩ب) . ويكون الشكل الدائري للملفات هو أصح تكوين لاحتمال مثل هذه الاجهادات ، ينشأ كذلك عن قوى التنافر بين كل موصل في أحد الملفين وجميع الموصلات في الملف الآخر قوة تنافر محصلة تعطي مركبتها الأفقية نفس التأثير المذكور ، بينما تعمل المركبة الرأسية على إطالة الملفات ، شكل (٧-٩أ) . هذا ويزداد قيمة المركبة الأولى ، وتقل قيمة الثانية في اتجاه منتصف الملف .

ب — توجد بين موصلات كل من ماني الضغط العالي والضغط المنخفض قوى تجاذب بسبب اتفاق إتجاه التيار فيها (شكل (٧-٢) كتاب هندسة الآلات الكهربائية) . وتعمل قوى التجاذب هذه على كبس الملف في محاولة لتقصيره ومسحقة شكل (٦-٩ب) ، ويمكن الملفات احتمال مثل هذه القوى في حالة حدوث دائرة قصر .

٢ — حالة عدم التماثل : يختلف تأثير القوى، في هذه الحالة، على حسب نوع عدم التماثل الموجود ، حيث يمكن التمييز بين أربع حالات على النحو التالي:

أ — عندما يكون الملفان متساويين في الطول ، ولكن اختلف وضع أحدهما بالنسبة للآخر ، كما هو مبين في شكل (٧-٩ب) . توجد بين موصلات الضغط العالي وموصلات الضغط المنخفض قوى تنافر تكون مائلة ، بسبب عدم تماثل وضع الملفين .



شكل (٨ - ٩)

ويمكن في هذه الحالة تحليل هذه القوى إلى مركبتين ، أحدهما تقوم بنفس دور قوى التنافر ، السابق ذكرها ، بينما تحاول الثانية أن تعمل على تحريك الملفين في اتجاهين متضادين ، مما يزيد في عدم تماثل وضعها ، كما هو واضح في شكل (٧ - ٩) . وتنتقل هذه القوى المحورية إلى الدعامات الطرفية التي أعدت لتحملها .

ب - عندما يختلف طول الملفين ويتماثل وضعهما من ناحية ، ويختلف من الناحية الثانية ، كما هو مبين في شكل (٨ - ٩) ، توجد في هذه الحالة قوى ضاغطة على الدعامات الطرفية تتوقف قيمتها على مقدار الفرق بين طول الملفين .

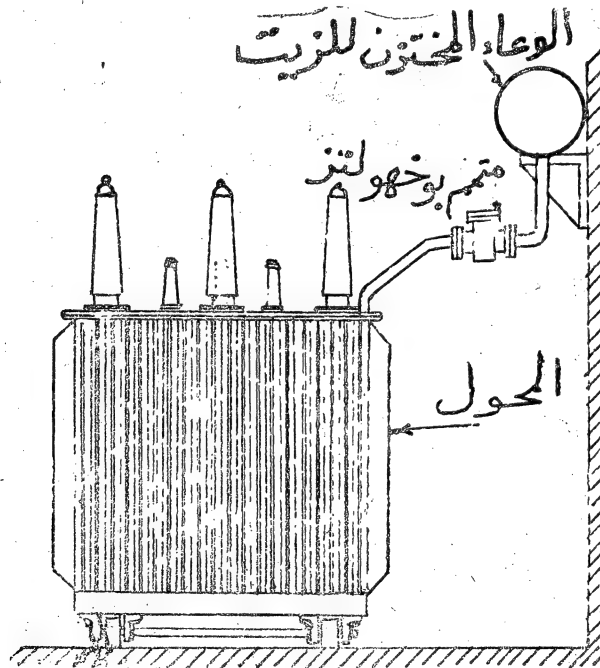
ج - عندما يختلف طول الملفين ، ويتماثل وضع أحدهما بالنسبة للآخر ، تكون القوى المؤثرة ، كما هو مبين في شكل (٨ - ٩) .

د - عندما ينقسم أحد الملفين إلى قسمين يتماثل وضعهما بالنسبة لللف الآخر

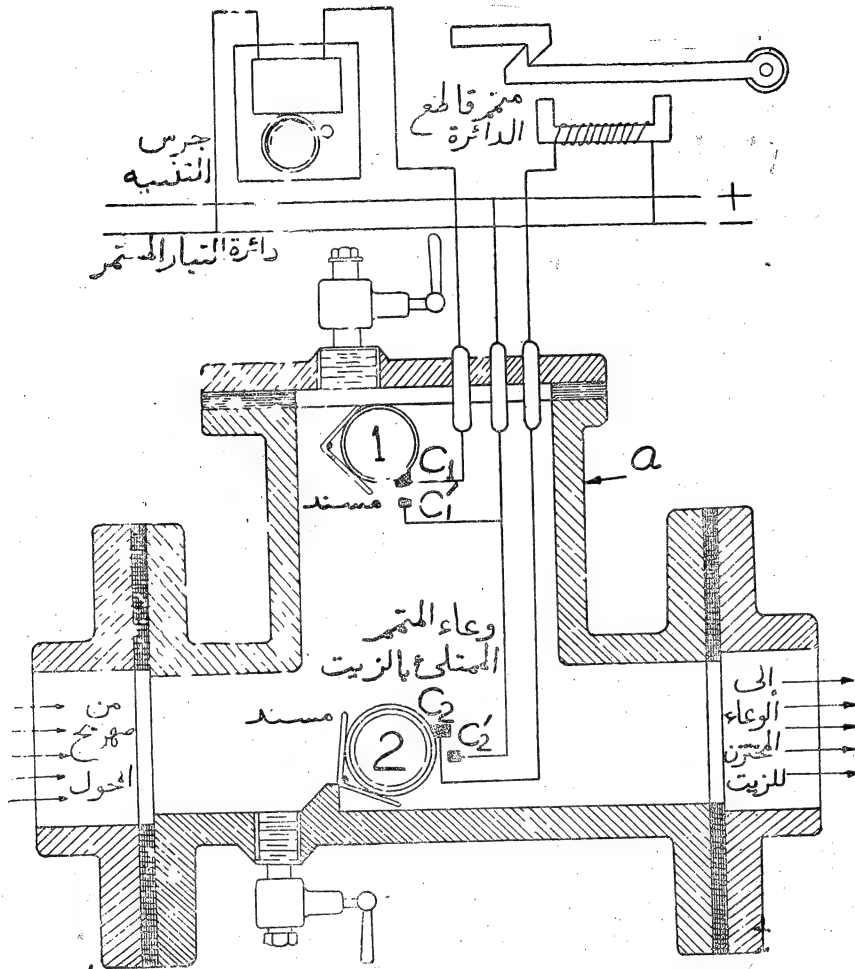
تكون اتجاهات القوى المؤثرة ، كما هو مبين في شكل (٨-٩) .

رابعاً - حماية المحولات : Protection of the transformers :

توجد عدة وسائل لحماية المحولات ، تختلف على حسب الأخطاء التي تتوقع حدوثها ، لسبب أو لآخر . والواقع أن دراسة هذه الوسائل تدخل في نطاق علم عظمات القوى الكهربائية ، ولكن جرت العادة على أن تشمل دراسة المحول على وصف تكوين وطريقة عمل جهاز واحد من أجهزة حمايته ، وهو منتم بوخهولتز (Buchholz Relay) ، وذلك باعتباره جزءاً من أجزاء المحول نفسه . يبين شكل (٩-١٠) موضع منتم بوخهولتز ، الذي يقع بين صهريج المحول الممتلئ بالزيت (transformer oil tank) ، والوعاء المخزن للزيت (oil conservator) ،



شكل (٩-١٠)



شكل (٩ - ب)

الذي يحتفظ فيه بسطح الزيت عند حد معين ، بعد امتلاء الصهر بيج والمتمم
امتلاء تاما بالزيت ، وذلك في ظروف التشغيل المعتادة . يبين شكل (٩ - ب)
تكوين متمم بوجهات ، وطريقة عمله لحماية المحول من إزدیاد طاریء في درجة
الحرارة ، أو حدوث دائرة قصر . يتضح من الشكل أن وعاء الممتلئ، الممتلئ

عادة بالزيت، يحتوى على عوامتين 1, 2 تستند كل منهما إلى مسند (support)
 يمنحها من الحركة . ويوجد على العوامة الأولى طرف التلامس c_1 ، القريب من
 طرف التلامس المناظر له في دائرة التيار المستمر c'_1 ، بينما يوجد على العوامة
 الثانية طرف التلامس c_2 ، وهو قريب من طرف التلامس المناظر له في دائرة
 التيار المستمر c'_2 . إذا حدث خطأ طفيف في المحول ، كأن يزداد الحمل عن
 الحد المقرر في فترة محدودة ، مما يؤدي إلى زيادة درجة الحرارة ، تنشأ فقاعات
 غازية في الزيت ، وتتصاعد فيه في إتجاه سطحه في الوعاء المخزن . وفي خلال
 صعود الفقاعات الغازية هذه ، وعبورها وعاء متمم بوخهولتز ، فانها تنحبس في
 الجزء العلوى منه ، المشار اليه بالحرف a في الرسم ، ضاغطة على سطح الزيت ،
 الذى ينحمر في هذا الجزء ، لى يترك مكانا لحلول الفقاعات ، مما يؤدي إلى ارتفاع
 سطح الزيت في الوعاء المخزن ، وهبوط العوامة 1 ، مع هبوط سطح الزيت في
 الجزء a من المتمم . بذلك يحدث التلامس بين c_1 ، c'_1 ، ويدق جرس التنبيه ،
 معلنا وجود خطأ طفيف ، يجب البحث عنه ، ومحاولة منعه من الاستفحال . فإذا
 اشتدت وطأة الخطأ ، يزداد تبعا لذلك معدل تولد الفقاعات الغازية ، فتزداد
 كمية الغاز الذى ينحبس في الجزء a . ويؤدي ذلك كله إلى قلقلة العوامة 2 من
 مكانها ، وحدوث التلامس بين c_2 ، c'_2 ، فتتم الدائرة التى تؤثر على قاطع الدائرة ،
 وتعمل على فصل المحول آليا عن النبوع . هذا ويمكن معرفة درجة خطورة الخطأ ،
 وسببه ، ومدى استمرارية ، بمراقبة لون الفقاعات الغازية المتصاعدة ، ومعدل نشرها ،
 من خلال نافذة صغيرة في وعاء المتمم . فإذا كان لون الغاز يميل إلى البياض ،
 فان هذا يعنى حدوث تلف في الورق العازل ، أما إذا كان يميل إلى الاصفرار ،
 فان التلف يكون في الخشب عادة . ويشير لون الفقاعات الرمادى أو الاسود إلى
 حدوث تحلل في الزيت نفسه .

خامسا - اختبار المحولات : (Transformer testing)

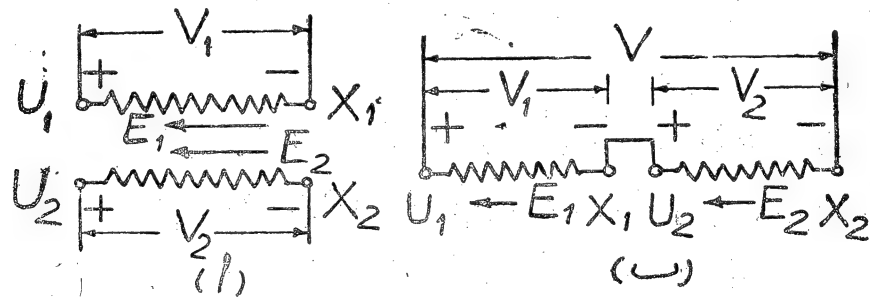
إن الأغراض التي يلزم من أجلها إجراء الاختبارات على المحولات متعددة ومختلفة ، فتجرى اختبارات روتينية (routine tests) على المحول قبل خروجه من المصنع ، كما تجرى عليه اختبارات معينة عند شرائه ، تمهيدا لقبوله أو رفضه (acceptance tests) . وقد يحتاج الأمر في بعض الأحيان إلى إجراء اختبار معين ، لتحديد خاصية معينة في المحول ، تتعلق بمحتاج تصميمه أو طريقة أدائه . وعلى العموم فأننا نستطيع تحديد عدد معين من الاختبارات ، ذات مواصفات معينة ، يمكن أن نخدم بعض هذه الأغراض ، أو كلها ، وتكون أساسا لأنواع الاختبارات المختلفة ، وذلك على النحو التالي :

١ - اختبارات الدائرة المفتوحة ودائرة القصر :

وقد سبق شرحها ، بالتفصيل ، وبيان النتائج المستفادة منها بالتفصيل .

٢ - تجديد المراحل :

في المحولات متعددة المراحل تتم تسمية أطراف المراحل المختلفة ، على



شكل (١٠ - ٩)

حسب نوع التوصيل ، بحيث يمكن تحديد الملفين الابتدائي والثانوي لكل مرحلة بسهولة . نرى في شكل (١ - ٨) ص ٣٩٠ ، مثلا ، أن الملفين الابتدائي والثانوي للمراحل الثلاث ، في حالة التوصيل نجمة ، هما على الترتيب $(N_2U_2 - N_1U_1)$ و $(N_2V_2 - N_1V_1)$ و $(N_2W_2 - N_1W_1)$ ، بينما يكونا في حالة التوصيل دلتا $(B_2R_2 - B_1R_1)$ و $(Y_2B_2 - Y_1B_1)$ و $(R_2Y_2 - R_1Y_1)$ على أساس التعاقب المرحلي U, V, W ثم B, R, Y في الحالتين على الترتيب . فإذا لم يتيسر تحديد المراحل نتيجة لترقيمها ، على النحو الصحيح ، يمكن التوصيل إلى ذلك بالتجربة ، فيوصل طرفا أحد الملفات الثانوية إلى فولتتر ، ثم يوصل ينبوع تيار مستمر ، ذو ضغط مناسب ، بحيث لا يمر تيار يزيد عن تيار الحمل الكامل ، إلى طرفي الملف الذي يظن أنه الملف الابتدائي المناظر . يمرر التيار ويقطع عدة مرات ، بفعل وفتح مفتاح الدائرة ، فإذا تحرك مؤشر الفولتتر ، في أثناء ذلك ، نكون قد عثرنا على الملف المطلوب ، وإلا وجبت تجربة ملف آخر ، حتى نعرث عليه .

٣ — تحديد قطبية الملفات :

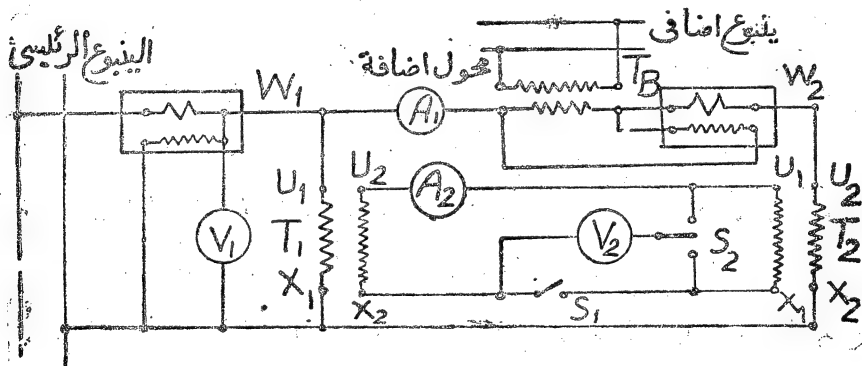
تنص المواصفات القياسية المتداولة (Standard specifications) على أن يتم ترقيم الملفين الابتدائي والثانوي ، على النحو السابق ، بحيث يكون لإتجاه القوة الدافعة الكهربائية فيها ، في نفس الاتجاه ، إذا بدأنا من طرفين متناظرين في التسمية ، كما يتضح من شكل (١٠ - ٩) حيث يكون لإتجاه E_1 من X_1 إلى U_1 ، وإتجاه E_2 من X_2 إلى U_2 . وهذا يعني أنه عندما يكون الطرف X_1 موجبا والطرف U_1 سالبا ، من ناحية ينبوع ، يكون الطرف X_2 موجبا ، والطرف U_2 سالبا ، ناحية الحمل . وعلى هذا الأساس وضعت الإشارات الموجبة والسالبة

في شكل (٥-٨) مثلاً . هذا ، ويمكن التأكد من صحة ترقيم الملفين ، على هذا النحو ، بتوصيل الملفين على التوالي ، كما هو مبين في شكل (١٠-٩) ، إلى ينبوع التيار المتردد المعتاد ، حيث يجب أن يكون الضغط على طرفي للاف الابتدائي V_1 أصغر من ضغط للينبوع V ، في هذه الحالة .

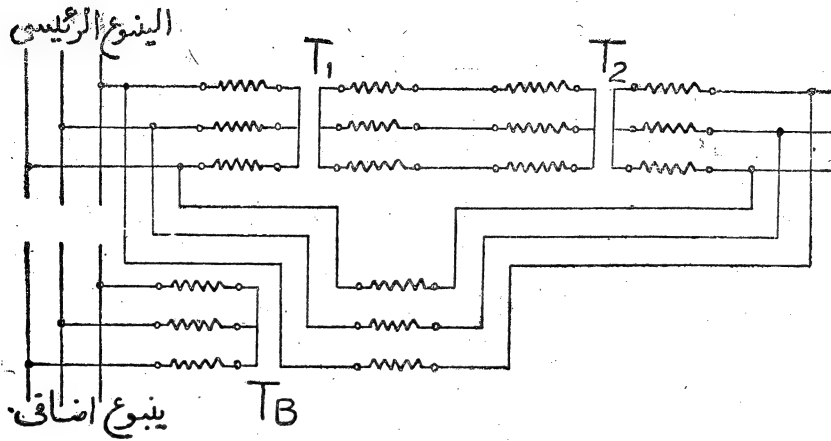
٤ - اختبار التوصيل المتضاد (Back to back test) :

إن الأصل في فكرة اجراء الاختبار المتضاد ، كما سبق شرحه في آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربائية ص ٤٤٢) ، هو اختبار الآلة ، وهي في ظروف الحل الكامل ، مع تكبد نفقات مفقوداتها فقط . ويجب أن يكون لدينا ، في هذه الحالة ، آلتان متماثلتان ، حتى يمكن توصيلها بالتضاد على الينبوع ، كما هو مبين في شكل (١١-٩) ، بالنسبة لمحولين مفردى المرحلة ، وفي شكل (١٢-٩) ، بالنسبة لمحولين ثلاثى المرحلة .

ويلاحظ أنه ، بناء على ما جاء في البند السابق ، لا يمر أى تيار في الدائرة المكونة



شكل (١١-٩)



شكل (١٢-٩)

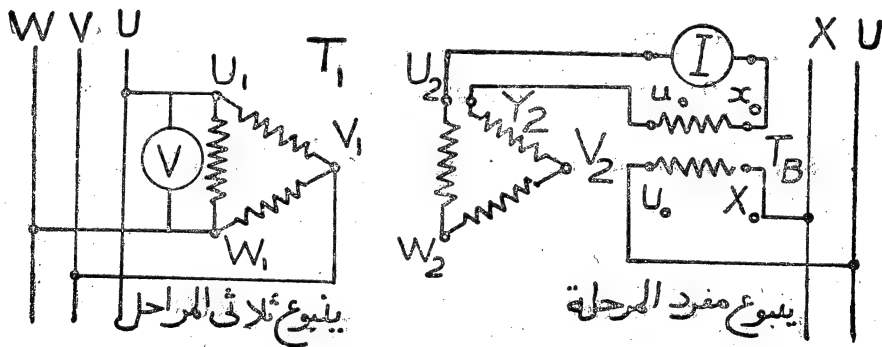
من الملفين الثانويين ، اللذين يولدان قيمتين متساويتين للقوة الدافعة الكهربائية ، ويكونان موصلين بالتضاد ، في هذه الحالة . ويجب التأكد من صحة التوصيل ، على هذا النحو ، بقياس الضغط V_2 ، على طرفي المفتاح S_1 ، قبل قفله ، الذي يجب أن يساوى صفراً ؛ في هذه الحالة . ومن البديهي أن قراءة الواتمتر W_1 تعطى مجموع المفقودات الحديدية في المحولين حيثئذ ، أي ضعف مفقودات الحديد في أحدهما ، بينما تكون قراءة W_2 صفراً . يستخدم محول الاضافة T_B لتمرير تيار الحمل الكامل في المحولين ، وذلك بضبط قيمة ضغط الينبوع الاضافي ، الذي يغذى هذا المحول . وتكون هذه القيمة مساوية لمجموع هبوط الضغط في المحولين معاً ، عند الحمل الكامل ، وهبوط الضغط في محول الاضافة ، عند التيار المار فيه . ويقرأ الواتمتر W_2 ، في هذه الحالة ، قيمة مفقودات مربع التيار ($I^2 R$ losses) في المحولين معاً ، عند تيار الحمل الكامل ، المار في المحولين . هذا ، ونظراً لأن مهمة محول الإضافة تتعلق بالتيار المار في المحولين ، ومفقودات مربع التيار ، ولعلاقة لها بمفقودات الحديد في المحولين ، فليس من الضروري أن يكون تردد الينبوع الاضافي ، الذي يغذى محول الاضافة ، مساوياً للتردد للمحولين المختبرين بالتضاد .

يمكن الاستعاضة عن محول الاضافة ، لتمرير تيار الحمل الكامل في المحولين ، بالعمل على انتفاء التوازن بين القوتين الدافعتين الكهربيتين المتضادتين ، في الملفين الثانويين للمحولين ، الموصلين بالتضاد ، بالقدر الذي يسمح بمرور هذا التيار فيها . ويكون ذلك بتغيير عدد اللفات ، في الملف الثانوي لاحد المحولين ، ولا يمكن T_2 مثلاً ، باستخدام نقط التقسيم المتاحة على هذا الملف .

٥ - اختبار التيار الدائري في المحولات الموصلة دلتا / دلتا :

(Circulating current test in delta/delta connected transformers)

يعتمد هذا الاختبار على أساس فتح الدلتا في الملف الثانوي للمحول ، وتوصيل ضغط مناسب ، من ينبوع تيار متردد اضافي ، يعمل على تمرير تيار الحمل الكامل في المحول ، دون أن يوجد الحمل ، الذي يستهلك القدرة المضاجبة لمرور هذا التيار . يبين شكل (١٣ - ٩) طريقة التوصيل في هذه الحالة ، وكما حدث في حالة اختبار التوصيل المتضاد ، فإن المحول المختبر يأخذ مقفودات



شكل (١٣ - ٩)

الحديد من ينبوع الرئيسي ثلاثي المراحل ، بينما يأخذ مقفودات المنحاس من

البنوع الإضافي ، مفرد المرحلة ، الذي لا يحتاج أن يكون تردده مساويا لمقنن تردد المحول ، على هذا الأساس . والميزة الكبرى لهذا الاختبار أننا لا نحتاج فيه إلى محول آخر ، مماثل للمحول المراد اختباره ، ولكن عيبه أن يقتصر اجراؤه على المحولات الموصلة دلتا/دلتا فقط .

مثال (١) :

Two identical, 3 phase, 50 c/s, transformers; each rated 30 KVA, 6000/525 V, star/star, were subjected to a back to back test. With the secondary winding of one transformer being tapped at 94 % of its total turns, a current of 27 amps was made to circulate in each secondary phase. The power input measured by two wattmeters was 1250 W. If the iron losses per transformer were 315 W, find:

- (a) the percentage impedance, reactance, and resistance drops for each transformer.
- (b) the efficiency and percentage regulation for full load, 0.8 power factor lagging.

نحسب أولا تيار الحمل الكامل I_1, I_2 في الملفين الابتدائي والثانوي ، لكل

محول :

$$I_1 = \frac{30 \times 1000}{\sqrt{3} \times 6000} = 2.88 \text{ A} , \quad I_2 = \frac{30000}{\sqrt{3} \times 525} = 33 \text{ A}$$

حيث أن الملف الثانوي لأحد المحولين يحتوي على 94 % فقط من اللفات ، فإن

هذا يعني زيادة في قيمة القوة الدافعة الكهربائية للآخر بمقدار 6 % . أي أن 6 %

من قيمة الضغط عملت على تمرير تيار قيمته 27 أمبير في معاوقة المحولين ،
وهما في الوضع المذكور . فإذا اعتبرنا أن خروج 6 % من ملفات أحد المحولين ،
من الدائرة المتكونة من ملفات المحولين على التوالي معا ، وهما متصلان بالتضاد ،
يخفض قيمة المعاوقة لهذا المحول بنفس هذه النسبة ، فإن هذا يعنى أن 6 % من
قيمة الضغط المقنن للمحول أدت إلى تمرير تيار مقداره 27 أمبير فى 194 % من
معاوقة المحول الواحد : لذلك نجد أن تيار الحمل الكامل يمر فى معاوقة المحول
الواحد ، عند عمل دائرة قصر عليه ، بنسبة مئوية من الضغط المقنن مقداره :

$$I_2 Z_{2eq} \% = \frac{6}{1.94} \times \frac{33}{27} = 3.77$$

وهذه هى قيمة هبوط الضغط النسبى فى المعاوقة (percentage impedance drop)
ثم باعتبار أن كلا من مقاومة وممانعة التسرب للمحول ذى
نقط التقسيم قد انخفضت بمقدار 6 % ، فإن مفقودات النحاس تنخفض فى هذا
المحول بنفس النسبة . وبذلك نجد أن الـ 1550 وات عبارة عن ضعف مفقودات
الحديد فى المحول الواحد ، مضافا إليها 1.94 من قيمة مفقودات النحاس للمحول
الواحد أيضا ، عند مرور التيار 27 أمبير فيه .

$$\therefore 1.94 P_{cu} = (1250 - 630) \times \left(\frac{33}{27} \right)^2$$

$$P_{cu} = \frac{620 \times 1.5}{1.94} = 480 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} I_2 R_{2eq} \% &= \frac{100 I_2 R_{2eq}}{V_1} = \frac{3 I_2^2 R_{2eq} \times 100}{3 I_2 V_1} \\ &= \frac{P_{cu} \times 10^2}{KVA \times 10^3} \end{aligned}$$

وبذلك يمكننا أن نحصل على قيمة هبوط الضغط النسبي في المقاومة $I_2 R_{2eq} \%$ (percentage resistance drop) من المعطيات المعطاة والمحسوبة ، حيث :

$$I_2 R_{2eq} \% = \frac{480 \times 10^2}{30 \times 10^3} = 1.6$$

ونحصل على قيمة هبوط الضغط النسبي في عازلة التسرب (percentage reactance drop) $I_2 X_{2eq} \%$ ، بعد ذلك ، على النحو الآتي :

$$\begin{aligned} I_2 X_{2eq} \% &= \sqrt{(I_2 Z_{2eq} \%)^2 - (I_2 R_{2eq} \%)^2} \\ &= \sqrt{(3.77)^2 - (1.6)^2} = 3.42 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_2 + P_{cu} + P_{Fe}} = \frac{30 \times 1000 \times 0.8}{30 \times 1000 \times 0.8 + 480 + 315} \\ &= \frac{24000}{24795} = 0.967 = 96.7 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon \% &\approx I_2 R_{2eq} \% \cos \phi + I_2 X_{2eq} \% \sin \phi \\ &\approx 1.6 \times 0.8 + 3.42 \times 0.6 = 3.33 \end{aligned}$$

وهذه هي قيمة معامل التنظيم المئوي (percentage regulation)

مسألة على الباب التاسع

What useful purposes does the back to back test serve in practice. Give a connection diagram for two transformers in a back to back test including necessary measuring instruments and apparatus. What precautions should be taken in such a test ?

In a back to back test on two similar, star/star, 3-phase,

380/220 volt, 40 KVA transformers the two primaries are fed from a 3—phase, 380 volt supply while the secondaries are connected in series opposition. A current of 80 amp. is made to circulate in the secondaries, by tapping one secondary winding at 93 % of its number of turns. The sum of the readings of the two wattmeters connected to measure the power input is 1345 watts. If the iron loss of each transformer is 400 watts, calculate for full load of 40 KVA at 0.8 power factor :

- (a) the efficiency.
- (b) the percentage impedance, reactance and resistance drops.

الباب العاشر

تصميم المحولات

(Design of Transformers)

الأبعاد الرئيسية للمحول :

يتبع تصميم المحولات منهاجا مماثلا لذلك الذى اتبعناه فى تصميم آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة ، من حيث ارتباط الأبعاد الرئيسية ، أو الأبعاد الرئيسية ، أو الأبعاد الموجهة ، للمحول ، بالحل النوعى المغناطيسى والحل النوعى الكهربائى ، وهما اللذان يحددان مقادير الاجهادات ، التى تتعرض لها المواد الداخلة فى تكوين المحول ، بسبب ارتفاع درجة حرارتها ، الناشئة عن المفقودات ، كما سبق شرحه . ويكون الحل النوعى المغناطيسى عبارة عن كثافة الفيض المغناطيسى فى القلب الحديدى للمحول ، الذى يتحدد على أساس مساحة الحديد فى مقطع هذا القلب ، وهى أول الأبعاد الرئيسية المطلوبة . أما الحل النوعى الكهربائى ، فهو عبارة عن مقدار الامبير لفات (أو الامبير موصلات) لكل سنتيمتر من طول الساق ، الذى توضع عليه اللفات ، ويحدد طول الساق ، فى هذه الحالة ، ارتفاع النافذة (window) ، التى تحتوى على الملفات ، بحيث يمكن تحديد عرض النافذة ، ونكون بذلك قد حصلنا على الأبعاد الرئيسية الثلاثة للمحول ، وهى مساحة القلب الحديدى ، وبعدها النافذة .

يتوقف مدى التوفيق فى اختيار القيم المناسبة ، لكل من الحل النوعى الكهربائى

والحمل النوعى المغناطيسى ، للحصول على أحسن وأرخص محول ، على مقدار الخبرة السابقة ، المكتسبة من خلال ممارسة صناعة المحولات ، تماما كما هو الحال بالنسبة لتصميم أى نوع من أنواع الآلات الكهربائية الأخرى ، التى سبقت دراستها .

سوف ندرس بعض العوامل ، التى تتأثر بالحمل النوعى المغناطيسى ، أو الحمل النوعى الكهربائى ، وذلك حتى يمكن استنباط قيم الأبعاد الرئيسية للمحول بدلالة هذه العوامل . كما أننا سوف نجد ، على هذا الأساس ، أن الحمل النوعى الكهربائى لا يظهر فى المعادلات بشكله الذى تم تعريفه ، وإنما من خلال العوامل التى تتأثر به .

١ — مفقودات الحديد :

يتكون حديد المحول (الساق والفك leg and yoke) من رقائق ، يكون سمكها عادة 0.35 مم أو 0.5 مم ، ويفصل بينهما طبقة رقيقة من مادة عازلة ، لئلا تتعدى مفقودات التيار الإعصارية حدا معيناً ، كما سبق شرحه فى مناسبات عديدة . ويتم حساب مفقودات الحديد فى المحول عادة على أساس المفقودات النوعية لكل كيلوجرام من وزن الرقائق ، التى نحصل عليها من المصنع المنتج للرقائق . إذ يقوم المصنع باختبار هذه الرقائق ، فى آخر مراحل إنتاجها ، وذلك لتحديد قيمة مفقودات الحديد (التخلف والتيارات الإعصارية معا) لكل كيلو جرام من وزن الرقائق ، عندما تكون قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية 10 كيلو جاوس ، والتردد 50 ذبذبة فى الثانية . ويرمز لهذه القيمة بالرمز V_{10} ، كما يمكن حساب المفقودات النوعية لنفس هذه الرقائق ، التى يرمز لها بالرمز p_{Fe} ، عندما تكون قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية ، فى

القلب الحديدى الذى تصنع منه ، B جاوس ، والتردد f ذبذبة/ثانية ، من العلاقة الآتية :

$$P_{Fe} = V_{10} \times \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \times \left(\frac{f}{50} \right) \text{ W/Kg} \quad (١٠-١)$$

فاذا كان وزن الرقائق المستخدمة فى حديد المحول G_{Fe} كيلو جرام ، وكان K_b معامل تجريبي (قيمته حوالى 1.1) ، نستخدمه لى نأخذ فى الحساب الزيادة ، الناشئة عن تجميع الرقائق ، فى قيمة المفقودات ، تكون المفقودات الحديدية فى المحول P_{Fe} بالوات عبارة عن :

$$P_{Fe} = p_{Fe} \times G_{Fe} \times k_b$$

$$= V_{10} \times \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \times \left(\frac{f}{50} \right) \times G_{Fe} \times K_b \dots\dots (١٠-٢)$$

ونظرا لاننا نستخدم نفس قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية فى الساق والفك معا ، لى نحصل على أقل قيمة ممكنة للمفقودات من هذه الناحية ، فان المعادلة (١٠-٢) نستخدم للحصول على مفقودات الحديد الكلية فى المحول ، باعتبار أن G_{Fe} عبارة عن وزن الرقائق المستخدمة فى السيقان والفكوك جميعها .

٢ — مفقودات النحاس (أو الالومنيوم) ، أى مفقودات مربع التيار :

يستخدم النحاس أو الالومنيوم ، على حسب الظروف ، فى صنع الأسلاك التى تتكون منها ملفات المحول . ويمكن تحديد قيمة للمفقودات النوعية ، فى هذه الحالة ، يتحدد على أساسها وزن النحاس أو الالومنيوم ، الذى يستخدم فى المحول ، فتتم مقارنته بوزن الحديد ، ويكون لذلك أثره المطلوب فى منهاج التصميم . ويكون تحديد قيمة المفقودات النوعية للنحاس أو الالومنيوم p_{cu} بدلالة كثافة

التيار في الموصلات ، التي تؤثر بطريق غير مباشر على الحمل النوعي الكهربائي للنحول ، على النحو التالي : نفرض أن وزن النحاس المستخدم في الملفين الابتدائي والثانوي هو G_{cu} كيلوجرام ، و m هو عدد السيقان ، و I التيار لكل ساق ، و l_m متوسط طول اللفة حول الساق بالامتار ، و a مساحة مقطع الاسلاك في الملفات ، حيث تكون z كثافة التيار بالأمبير لكل مليمتر مربع . فإذا كانت درجة الحرارة القصوى ، التي تصل اليها الملفات هي 90 درجة مئوية ، فإن المقاومة النوعية للنحاس عند هذه الدرجة هي $\rho_{cu} = 0.022$ أوم مم²/متر ، كما أن المقاومة النوعية للالومونيوم عند نفس الدرجة هي $\rho_{al} = 0.029$ أوم مم²/متر . وباعتبار أن الوزن النوعي للنحاس $\gamma_{cu} = 8.9$ جم/سم³ نجد أن :

$$P_{cu} = \frac{m I^2 \times \rho_{cu} \frac{l_m T}{a} K_{ad}}{m \times a \times l_m \times T \times \gamma_{cu} \times 10^{-3}} = \frac{K_{ad} \rho_{cu} j^2}{\gamma_{cu} \times 10^{-2}} \text{ W/Kg}$$

$$P_{al} = \frac{K_{ad} \rho_{al} j^2}{\gamma_{al} \times 10^{-2}} \text{ W/Kg} \dots\dots\dots (١٠ - ٢)$$

حيث K_{ad} معامل يأخذ في الاعتبار زيادة المفقودات ، نتيجة لعوامل مختلفة لا يمكن حصرها حسابيا . وتحدد قيمة هذا المعامل تجريبيا ، بناء على ذلك ، بحوالى 1.1 . فإذا عوضنا ، علاوة على ذلك ، في المعادلة (١٠ - ٢) بالقيم الخاصة بكل من النحاس والالومونيوم ، نحصل على مفقودات مربع التيار النوعية ، لكل منهما بدلالة كثافة التيار ، على النحو التالي :

$$P_{cu} \approx 2.7 j^2 \text{ W/Kg} , \quad P_{al} \approx 11.8 \text{ W/Kg} \dots\dots\dots (١٠ - ٤)$$

ويلاحظ أننا اعتمدنا ، في استنباط المعادلة (١٠ - ٢) ، على أن الأمبير لفات متساوية في كل من الملف الابتدائي والملف الثانوي ، وهذا صحيح . كما

أننا اعتبرنا أن كثافة التيار واحدة فيها ، وهو ما يراعى فعلا في تصميم المحولات ، لأن تساوى كثافة التيار في الملفين يؤدي إلى اعطاء أقل قيمة ممكنة لمفقودات مربع التيار فيهما ، وهو ما يمكن اثباته بالحساب بطريقة سهلة .

إذا كانت P_{cu} هي مفقودات النحاس الكلية في المحول ، فن الواضح أن :

$$P_{cu} = p_{cu} \times G_{cu} , \quad P_{al} = p_{al} \times G_{al} \dots\dots\dots (١٠-٥)$$

٣ — النسبة بين مفقودات الحديد ومفقودات النحاس :

ويرمز لها عادة بالرمز β ، وهي تختلف على حسب ماذا كان المحول للقدره أو للتوزيع ، كما سبق شرحه في الباب السابع (ص ٣٦٤ ، ٣٦٥) . وفيما يلي حدود β بالنسبة لنوعى المحولات :

في حالة محولات التوزيع تكون قيمة β من 0.15 إلى 0.5

في حالة محولات القدرة تكون قيمة β من 0.5 إلى 0.9 .

كذلك تتحدد قيمة النسبة α بين وزن الحديد ووزن النحاس تجريبيًا ، بناء على ذلك ، كما يأتي :

$$\alpha = \frac{G_{Fe}}{G_{cu}} \underline{\underline{2 - 4}}$$

٤ — معامل الجودة والمفقودات النوعية :

سبق أن بينا في الباب السابع (ص ٣٦٢ ، ٣٦٤) ، أن قيمة معامل الجودة ، عند الحمل الكامل ، تتوقف على قيمة النسبة β كما أن تناول هذه الظاهرة من ناحية أخرى يعنى أننا قد نحصل على قيمة النهاية العظمى لمعامل الجودة عند الحمل الذى تصبح فيه مفقودات النحاس ، لهذا الحمل ، مساوية لمفقودات الحديد الثابتة

القيمة تقريبا (المعادلة ١٣ — ٧ ص ٣٦٤) . وقد أوضحنا ، في نفس الوقت ، تأثير ذلك على تحديد قيمة النسبة β ، في كل من نوعي محولات القدرة ومحولات التوزيع ، على حسب طبيعة تشغيل كل منهما . فإذا تحددت قيمة قدرة المخرج الدحول P_2 كيلوات (كما يطلبها الزبون) ، وأمكن تحديد قيمة لمعامل الجودة η (تجريبيا على حسب الخبرة السابقة) ، فإنه يمكن الربط بينهما ، وبين المفقودات الكلية للدحول P_v ، وجميع العوامل السابقة ، على النحو التالي :

$$P_v = \frac{P_2}{\eta} (1 - \eta) = P_{cu} + P_{Fe} = P_{cu} (1 + \beta)$$

$$P_{cu} = \frac{P_2}{\eta} \cdot \frac{1-\eta}{1+\beta} , \quad P_{Fe} = \frac{P_2}{\eta} \cdot \frac{1-\eta}{1+\beta} \cdot \beta \dots (١٠-٦)$$

$$G_{cu} = \frac{P_{cu}}{p_{cu}} , \quad G_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{p_{Fe}} \dots \dots \dots (١٠-٧)$$

يمكننا الآن ، بناء على ما سبق كله ، تحديد قيمة للمفقودات النوعية p_v ، وهي عبارة عن قيمة المفقودات الكلية بالوات لكل كيلوجرام من مجموع وزني النحاس والحديد في المحول ، على النحو الآتي :

$$p_v = \frac{P_{cu} + P_{Fe}}{G_{cu} + G_{Fe}} = \frac{P_{cu}(1+\beta)}{G_{cu}(1+\alpha)} = p_{cu} \frac{(1+\beta)}{(1+\alpha)} (١٠-٨)$$

كما يمكننا ، من الناحية التجريبية ، وضع الحدود الآتية لقيمة p_v :

في المحولات ثلاثية المراحل تكون قيمة p_v من 6 إلى 10 وات/كجم

في المحولات مفردة المرحلة تكون قيمة p_v من 4 إلى 7 وات/كجم

مساحة مقطع الحديد في القلب أو الساق :

إن تحديد قيمة مناسبة لمساحة مقطع الحديد في القلب أو الساق يتوقف على قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط B في هذا القلب . ويمكن أن يتم ذلك ببساطة على أساس قيمة تجريبية معينة ، للضغط على كل لفة E_t (Voltage per turn) ، كما يأتي :

$$E = 4.44 f T \phi \times 10^{-8} = 4.44 f T B A_{Fe} \times 10^{-8} V$$

$$E_t = \frac{E}{T} = 4.44 f B A_{Fe} \text{ volts/turn} \dots\dots\dots (١٠-٩)$$

ويمكن أن تتحدد القيمة التجريبية لـ E_t من الجدول الآتي ، على حسب نوع المحول ، وقدرة المخرج KVA بالكيلوفولت أمبير ، عند 50 ذبذبة في الثانية :

المحول ذو القلب		المحول الهيكلي		K.V.A. 50 c/s
مفرد المرحلة	ثلاثي المراحل	مفرد المرحلة	ثلاثي المراحل	
5	3.3	11	7	100
11	7.5	25	14	500
15	10	30	20	1000
35	25	60	35	3000
60	50	100	60	10000
85	70	140	80	20000
—	85	—	100	30000

كذلك يمكن تحديد مساحة مقطع الحديد في القلب أو الساق ، على أساس قيم معينه ، لجميع العوامل المؤثرة ، التي سبق عرضها ، وذلك بعد أن نحصل على المعادلة ، التي تربط بين قيمة هذه المساحة ، وتلك العوامل ، كما يأتي :

$$KVA = 4.44 f T B A_{Fe} \times a_j \times 10^{-11}$$

كيلو فولت أمبير :

$$= C_1 f T B A_{Fe} \times a_j \dots\dots\dots (١٠-١٠)$$

كيلو جرام :

$$G_{Fe} = A_{Fe} l_{Fe} \gamma_{Fe} \times 10^{-3}$$

حيث l_{Fe} هو طول الحديد في السيقان والفكوك جميعها ، باعتبار أن مساحة مقطع الساق تساوي مساحة مقطع الفك ، وهي A_{Fe} ، لكي نحصل على أقل قيمة ممكنة لمفقودات الحديد في السيقان والفكوك معا ، كما سبق ذكره .

كيلو جرام :

$$G_{cu} = 2 T a l_m \gamma_{cu} \times 10^{-3}$$

$$\frac{G_{Fe}}{G_{cu}} = \frac{P_{Fe}}{p_{Fe}} \times \frac{P_{cu}}{P_{cu}}$$

$$\frac{G_{Fe}}{G_{cu}} = \beta \frac{P_{cu}}{p_{Fe}} = \frac{A_{Fe}}{Ta} \times \frac{l_{Fe} \times \gamma_{Fe}}{2 l_m \times \gamma_{cu}}$$

يمكننا اعتبار قيمة النسبة بين l_{Fe} و l_m ثابتة لنفس المحول ، فنجد أن المعادلة السابقة تعطينا العلاقة الآتية :

$$Ta = C_2 \frac{P_{Fe}}{P_{cu}} \times \frac{A_{Fe}}{\beta_2} \quad (C_2 \text{ ثابت معلوم})$$

$$\therefore KVA = C_1 C_2 \cdot \frac{A_{Fe}^2 f B j \times 10^{-11}}{\beta \cdot \frac{P_{cu}}{P_{Fe}}}$$

$$\therefore A_{Fe} = C \sqrt{\frac{KVA \times \beta \times (P_{cu}/P_{Fe}) \times 10^5}{f \times B \times j}} \text{ سم} \quad (10-11)$$

تحدد قيمة تجريبية للثابت C ، على حسب نوع المحول ، وطريقة تنفيذ ملفاته ، من الجدول الآتي :

نوع المحول والملفات	مفرد المرحلة	ثلاثي المراحل
قلب حديدي ملفات دائرية المقطع	43 — 47	34 — 37
قلب حديدي ملفات مستطيلة المقطع	53 — 60	42 — 47
ميكل	82 — 92	55 — 61

وفي حالة المحولات ، التي تستخدم فيها ملفات من الألومنيوم ، تكون قيمة C حوالى 60 % من القيمة المناظرة في الجدول السابق .

يمكن تحديد القيم التي يسمح باستخدامها لكل من B و Z ، على حسب نوع الرقائق المستعملة ، وطريقة التبريد ، من الجدولين الآتيين :

B بالجائوس

نوع المحول	الرقائق العادية	رقائق مخصوصة من السبائك
محول توزيع	5500 — 7500	11000 — 14000
محول قدرة	10000 — 13000	تصل إلى 15000

ز بالأمبير لكل ملليمتر مربع

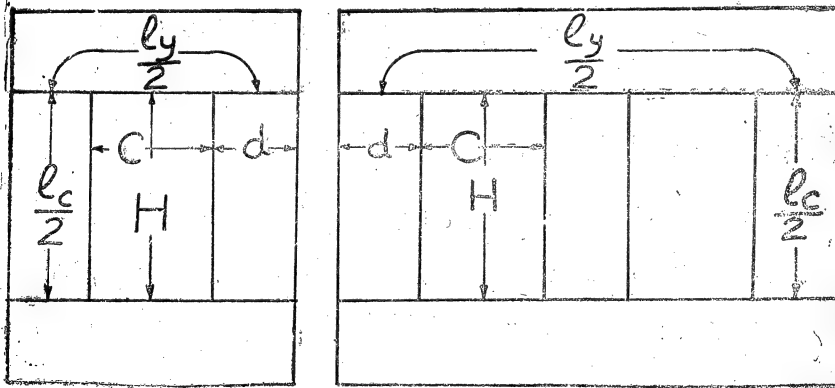
ملفات الألومونيوم	ملفات النحاس	نوع التبريد
1.0 — 1.4	1.3 — 1.8	ذاقي بالهواء
1.5 — 1.8	2.0 — 3.5	صناعي بالهواء
1.9 — 2.3	2.5 — 4.0	بالماء

يجب ، بعد حساب مساحة مقطع الحديد في الساق ، باستخدام المعادلة (١٠-١١) ، المراجعة على قيمة E_f ، باستخدام المعادلة (٩-١٠) ، بحيث تقع في الحدود المبينة في الجدول المعطى . كما يتعين علينا ، بعد ذلك ، تحديد شكل المقطع بواحد من الأشكال المعطاة في شكل (٤-١٧) ، ص ٣٣٣ ، ثم تعيين قيمة قطر الدائرة المحيطة d ، بناء على ذلك . هذا ويكون المقطع على شكل صليب ، في المحولات الصغيرة ومتوسطة الحجم ، حيث تتوافر قنوات تبريد ، كافية الحجم ، بين الحديد والملفات . ونحصل ، في هذه الحالة ، على أكبر مساحة يستفاد بها من الدائرة المحيطية ، عندما يكون عرض الدرجة الأولى للصليب $d = 0.526$ ، وعرض الدرجة الثانية $d = 0.851$. فإذا كان سمك الرقائق 0.35 ملليمتر ومعامل الحديد $k_f = 0.86$ (نسبة مساحة الحديد الصافي إلى مساحة المقطع A_{Fe}) ، يمكننا أن نعتبر أن نسبة مساحة الحديد الصافي إلى مساحة الدائرة المحيطية حوالي 0.67 . وترتفع قيمة هذه النسبة إلى 0.708 عندما يكون سمك الرقائق 0.5 مم . وعندما يكون القلب الحديدي مقعياً على ثلاث درجات ، ومكوناً من خمسة مقاطع (5 packers) ، كما هو مبين في شكل (٤-٧ب، ح)

على اليمين ، نجد أن عرض الدرجة الأولى يكون $0.42d$ ، وعرض الثانية $0.7d$ وعرض الثالثة $0.9d$ ، بينما تكون نسبة مساحة الحديد الصافي إلى مساحة الدائرة المحيطية حوالي 0.73 ، عندما يكون سمك الرقائق 0.35 مم ، و 0.76 عندما يكون سمك الرقائق 0.5 مم . أما إذا كان القلب الحديدي على أربع درجات أى أن القلب مكون من أربعة مقاطع ، كما هو مبين في شكل (١٧-أ) على اليمين ، يكون عرض الدرجة الأولى $0.36d$ ، وعرض الثانية $0.6d$ ، وعرض الثالثة $0.78d$ ، وعرض الرابعة $0.98d$. وفي هذه الحالة تكون نسبة مساحة الحديد الصافي إلى مساحة الدائرة المحيطية حوالي 0.76 ، عندما يكون سمك الرقائق 0.35 مم ، وحوالي 0.79 عندما يكون سمك الرقائق 0.5 مم .

أبعاد النافذة : (Window dimensions)

يجب أن يتحدد عرض النافذة C ، وارتفاعها H ، شكل (١-١٠) ، بحيث يمكن أن تستوعب المفاصل وملحقاتها . ويمكن أن يتم ذلك بإحدى الطريقتين الآتيتين :



شكل (١-١٠)

١ — باستخدام قيمة تجريبية لمعامل فراغ النافذة :

(Window space factor)

يعرف معامل فراغ النافذة k_w بأنه عبارة عن النسبة بين مساحة النحاس (أو الألومنيوم) الصافي الموجود في النافذة إلى مساحة فراغ النافذة $C \times H$. وتتوقف قيمة k_w على كل من قيمة الضغط العالي للمحول ، الذي يتحدد على أساسه سلك العازل على الموصلات ، وقيمة التيار ، أو مقنن القدرة ، الذي يتحدد على أساسه مساحة مقاطع الموصلات ، كما يتضح من الجدول الآتي :

k_w عند الضغوط المختلفة				مقنن القدرة KVA
100 KV	30 KV	10 KV	3 KV	
—	0.14	0.20	0.28	100
0.15	0.20	0.27	0.37	800
0.16	0.23	0.31	0.40	2000
0.21	0.28	0.37	0.45	10000

نبدأ في هذه الحالة بتحديد قيمة معينة لـ k_w ، من الجدول السابق ، أو على أساس تجريبي آخر ، وذلك على حسب مقنن قدرة المحول ، وضغطه العالي . نحسب بعد ذلك مساحة مقطع الملف الابتدائي a_1 مم² ، ومساحة مقطع الملف الثانوي a_2 مم² ، بمعاملية كثافة التيار δ ، في كل منهما ، والتيارين I_1 ، I_2 . بذلك يمكننا أن نحصل على مساحة النافذة ، أو حاصل الضرب $C \times H$ من العلاقة الآتية :

$$C \times H = \frac{a_1 T_1 + a_2 T_2}{k_w} \Rightarrow \text{المحول مفرد المرحلة} \quad (١٢-١٠)$$

$$C \times H = \frac{2(a_1 T_1 + a_2 T_2)}{k_w} \Rightarrow \text{المحول ثلاثي المراحل} \quad (١٣-١٠)$$

هذا ، ويمكننا ، من الناحية التجريبية أيضا ، تحديد النسبة بين H و C بالقيمة من 2 إلى 4 ، مما يجعلنا نحصل على كل منهما على حدة .

تكون المراجعة على قيمتي H , C من خلال ترتيب الملفات بملحقاتها (العازل عليها ، وقنوات التبريد ، والفواصل الخشبية ، واسطوانات الميكانيكيات ... الخ) ، والتأكد من كفاية الفراغ المتاح ، على النحو المطلوب ، بحيث يتم في خلال ذلك تعديل القيمتين ، حتى يفيا بالفرض بالضبط . نجد أن كلا من طول الساق ، وطول الفك ، يتحدد تلقائيا ، بعد ذلك .

٢ — بتحديد طول حديد السيقان l_c ، وطول حديد الفكوك l_y :

(Determination of the length of cores and length of yokes)

إن تحديد قيمة مفقودات الحديد الكلية P_{Fe} ، ومفقوداته النوعية p_{Fe} ، والاستفادة بها في خطوط التصميم السابقة ، ثم تحديد وزن الحديد G_{Fe} كيلوجرام بناء على ذلك ، يجعلنا قادرين على تحديد بعدى النافذة H , C ، على أساس الاحتياجات الفعلية للمحول ، وذلك بعد أن ارتبطت العوامل كلها في معادلة واحدة لتحديد مساحة مقطع حديد المحول ، التي نأخذها أساسا لنا في حسابات النافذة . فإذا فرضنا أن حجم الحديد الكلي ، في السمية ————— ان والفكوك معا ، هو

$$V_{Fe} = \frac{G_{Fe} \times 10^3}{\gamma_{Fe}}$$

المكتسبة في صناعة المحولات ، يمكننا أن نعتبر أن طول الحديد في الفكوك l_y

يساوى طول الحديد في السيقان l_c ، بحيث يساوى كل منهما نصف طول الحديد الكلى l_{Fe} ، على أساس مساحة مقطع واحدة للسيقان والفكوك معا A_{Fe} ، التى سبق تحديدها ، نجد أن :

$$v_{Fe} = \frac{G_{Fe} \times 10^3}{\gamma_{Fe}} = A_{Fe} \times l_{Fe} = 2 A_{Fe} l_y = 2 A_{Fe} l_c$$

$$\therefore l_c = l_y = \frac{l_{Fe}}{2} = \frac{v_{Fe}}{2 A_{Fe}} \dots\dots\dots (١٠-١٤)$$

بالرجوع إلى شكل (١٠-١) يمكننا أن نستنتج أنه ، بالنسبة للدول مفرد المرحلة ، يكون .

$$H = \frac{l_c}{2} = \frac{l_{Fe}}{4}$$

$$\frac{l_y}{2} = \left(C + \frac{\pi d}{2} \right) = \frac{l_{Fe}}{4} ,$$

$$C = \frac{l_{Fe}}{4} - \frac{\pi d}{2} \dots\dots\dots (١٠-١٥)$$

أما بالنسبة للدول ثلاثى المراحل ، فنجد أن :

$$H = \frac{l_c}{3} = \frac{l_{Fe}}{6}$$

$$\frac{l_y}{2} = \left(2C + d + \frac{\pi d}{2} \right) = \frac{l_{Fe}}{4}$$

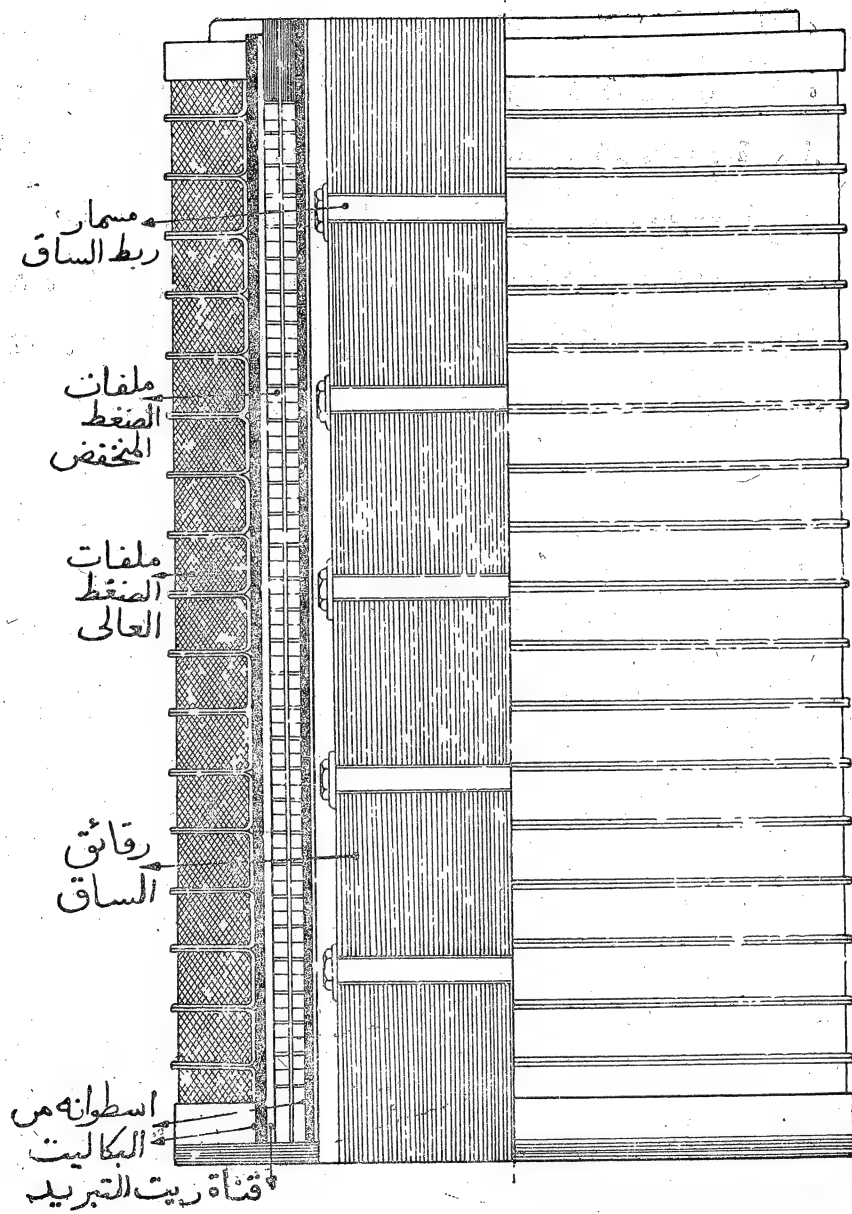
$$\therefore C = \frac{l_{Fe}}{8} - 1.3d \dots\dots\dots (١٠-١٦)$$

وعندما نحصل على قيمتى H , C بهذه الطريقة ، يجب المراجعة عليهما ، من

ناحية وقوع قيمة النسبة بينهما بين 2 و 4 كما جاء في 1 سابقا، ثم من ناحية وقوع قيمة k_w في الحدود التجريبية المعروفة . كذلك يجب أن تستوعب النافذة، في هذه الحالة ، الملفات على النحو الذى سبق ذكره في 1 .

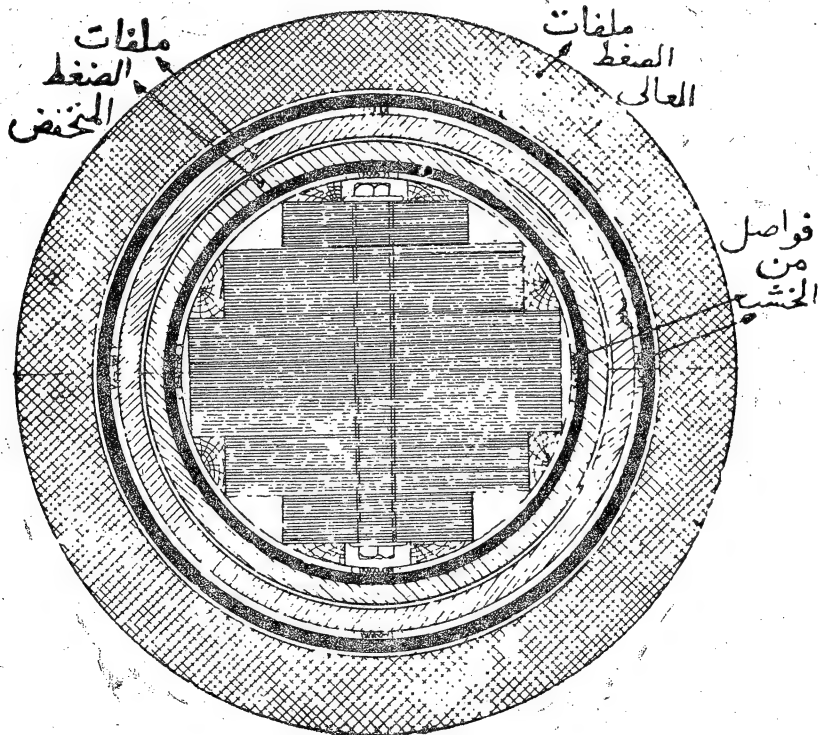
ترتيب الملفات في النافذة : (arrangement of the coils)

تكون الملفات دائرية (circular) ، أو مستطيلة (rectangular) ، على حسب ما إذا كان القلب الحديدي مدرجا ، أو مستطيل المقطع ، على الترتيب . كما أن الملفات قد تكون متركزة (concentric) ، كما هو الحال في الملفات الاسطوانية (cylindrical coils) ، أو متداخلة (sandwiched) ، كما هو الحال في الملفات القرصية (Disc coils) ، التى تستخدم غالبا في المحولات الهبكلية ، ويمكن معها التحكم بسهولة في الممانعة المكافئة للملفات . والملفات الاسطوانية قد تكون محورية بسيطة (simple coaxial) ، حيث يكون الملف الابتدائي عبارة عن اسطوانة واحدة ، وكذلك الملف الثانوى ، كما أنها قد تكون محورية مزدوجة (double coaxial) ، حيث يتكون كل ملف من اسطوانتين يتناوب وضعهما على القلب الحديدي ، وحيث يقع ملف ضغط على بين ملفي ضغط منخفض ، على أن يأتى ملف الضغط المنخفض أولا على القلب ، بسبب دواعى العزال ، وذلك في المحولات ذات القلب الحديدي . هذا ، ويمكن عن طريق تقسيم الملفات على هذا النحو التحكم في الممانعة المكافئة للمحول . أما في حالة المحول الهبكلى ، فإن سهولة عزل الملفات تقتضى أن يكون وضع ملف الضغط المنخفض من الخارج . هذا ، وتخدم الفراغات التى تترك بين الملفات ، بقصد عزلها عن بعضها البعض ، عند امتلائها بالزيت ، أغراض التبريد ، باستخدام



شكل (٢-١٠)

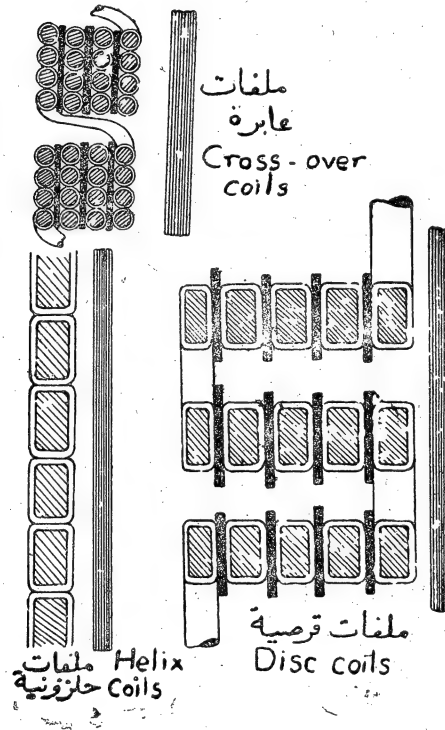
الزيت أيضا ، شكل (٢-١٠) . يتكون ملف الضغط العالي الاسطوانى عادة من عدة أقسام ، يلف كل قسم منها على بكرة من المادة العازلة (بكاليت مثلا) ، ويتكون من عدد محدود من اللفات ، التى لا يتجاوز الضغط عليها 1000 فولت ، شكل (٢-١٠) . وإذا أمكن عمل ملف الضغط العالي من قسم واحد ، فقد يصل الضغط عليه إلى 5000 أو 6000 فولت . ونحن نلجأ إلى تقسيم ملف الضغط العالي عادة ، لى يسهل تداوله ، حين يصبح من الصعب التعامل مع هذا العدد الكبير من اللفات ، التى تحتوى على كمية كبيرة من النحاس ، على دفعة واحدة . ويراعى أن تكون الملفات صلبة متماسكة بشدة ، حتى لا تتأثر بالقوى الكبيرة ، عند حدوث



شكل (٢-١٠)

دائرة قصر . كما يفصل بين البكرات ، في المحولات الكبيرة ، فواصل من المادة العازلة ، لكي يمكن مرور زيت التبريد بينها (غير مبيّنة في شكل (٢-١٠)) ، مما يزيد من فاعلية التبريد .

يبين شكل (٣-١٠) مقطعا للدلافات المبيّنة في شكل (٢-١٠) ، ويبين شكل (٤-١٠) الانواع المختلفة للدلافات .



شكل (٤-١٠)

يفضل باستمرار استخدام الدلافات الحازونية ، من طبقة أو طبقتين . ويتيسر ذلك عادة بالنسبة للدلافات المضغوطة المنخفضة ، التي يتم لفها ، في

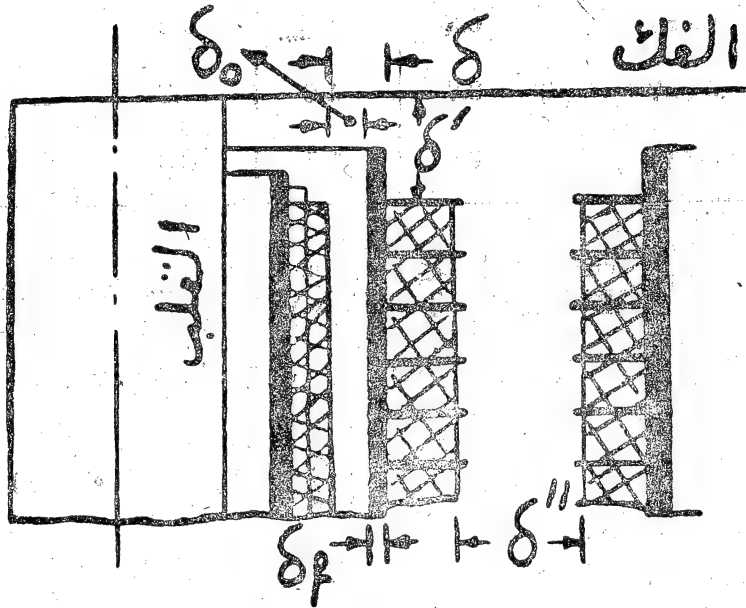
معظم الأحيان ، على هذا النحو . أما بالنسبة للملفات الضغط العالي ، فأننا نأجأ إلى استخدام هذا النوع من الملفات ، كلما أمكن ذلك .

عزل الملفات : (Insulation of the coils)

تستخدم اسطوانات (جوفاء) من البكالييت (bakelite paper cylinders) لعزل ملف الضغط المنخفض عن القلب الحديدي * ، ثم عزل ملف الضغط المنخفض عن ملف الضغط العالي . وبينما يكون أى من الملفين متركزاً على الاسطوانة العازلة كما هو واضح في شكل (٢ - ١٠) ، فقد يكون الغرض من وجود الاسطوانة العازلة فقط ، في بعض الأحيان ، عمل الفاصل اللازم لتحديد قناة التبريد ، التي يمر فيها الزيت لتبريد الملفات . ويكون عزل الملفات عن القلب ، فوقها وتحتها ، باستخدام حلقات من البكالييت ، ترص فوق بعضها البعض ، على حسب المسافة الموجودة ، وكذلك باستخدام فواصل من الخشب . كما تستخدم فواصل من الخشب أيضاً بين اسطوانات البكالييت العازلة والقلب الحديدي ، أو للملفات ، كما هو مبين في شكل (٣ - ١٠) . هذا ، وتتوقف قيمة المسافة δ' ، التي يجب تركها على الأقل بين حافة ملفات الضغط العالي وحديد القلب أو أقرب حديد اليها . من أعلى ومن أسفل ، على ضغط هذه الملفات ، كذلك تتوقف على هذا الضغط كل من المسافة δ بين السطح الداخلى للملفات الضغط العالي ، والسطح الخارجى لملف الضغط المنخفض ، والمسافة δ'' بين السطحين الخارجيين للملفي الضغط العالي ، في نفس النافذة ، أو بين السطح الخارجى لملف الضغط العالي ،

* لاحظ أننا نركز دائماً على المحول ذي القلب ، لأن هذا هو النوع الشائع عندنا . بينما تشير فقط إلى المحول الهيكلي ، لأن استخدامه نادر في بلادنا .

وسطح الصهريج القريب منها (على أساس وجـود الزيت
في الفراغات كلها) ، وسمك اسطوانة البكاليت δ_f ، التي تتركز عليها
مافات الضغط العالي ، وعرض قناة الزيت δ_o بين ملقى الضغط المنخفض ،



شكل (٥-١٠)

والضغط العالي . يبين شكل (٥-١٠) هذه المسافات ، كما يعطى الجدول الآتي:
قيم كل من δ_f و δ_o و δ مع القيم القياسية المختلفة لضغط ماف الضغط العالي V_1
حتى 20 كيلو فولت .

بالنسبة للضغوط أقل من 6 كيلو فولت تستخدم القيم المعطاة عند 6 KV ،
أما بالنسبة للضغوط ، التي تكون أعلى من 20KV ، فتستخدم القيم المعطاة عند
20KV لكل من δ_f و δ_o ، أما δ فيراعى ، في هذه الحالة ، أن يكون :

δ/V_1	المسافات بالسنتيمتر			V_1 KV
	δ_o	δ	δ_f	
0.100	0.4	0.6	0.2	6
0.080	0.6	0.8	0.2	10
0.067	0.7	1.0	0.3	15
0.060	0.9	1.2	0.3	20

$$0.06 \frac{\text{cm}}{\text{KV}} \leq \frac{\delta}{V_1} \leq 0.07 \frac{\text{cm}}{\text{KV}} \dots\dots\dots (١٧-١٠)$$

أما بالنسبة للمسافة δ' فتكون على أساس أن :

$$2 \leq \frac{\delta'}{\delta} \leq 2.5 \dots\dots\dots (١٨-١٠)$$

وبالنسبة للمسافة δ' يجب أن يكون :

$$\delta' \geq 2.5 \delta \dots\dots\dots (١٩-١٠)$$

وذلك على أساس عدم وجود أى فواصل من مادة عازلة بين السطحين ،
الذين يفصل بينهما المسافة δ' ، وإلا فإنه يمكن تصغير قيمة δ' إلى درجة أن
تصبح مساوية لـ 1.5δ تقريبا .

ويكون تحديد هذه المسافات جميعها ؛ فى حدود الأرقام المعطاة ، على أساس
صمود المواد العازلة ، وتحملها للجالات الكهربائية الناشئة عن الضغط العالى .
ولكننا قد نحتاج ، فى بعض الأحيان ، إلى تعديل قيمة δ ، بعيداً عن هذه الحدود ،

لتغيير قيمة الممانعة المكافئة ، لكي نحصل على قيمة معينة لضغط القصر (short circuit voltage) ، الذى يحدد تيار القصر الدحول ، كما سوف يتبين لنا فيما بعد . كذلك قد نحتاج إلى تعديل قيمة δ ، بفرض تحديد عرض معين لقناة التبريد ، فى أحوال خاصة .

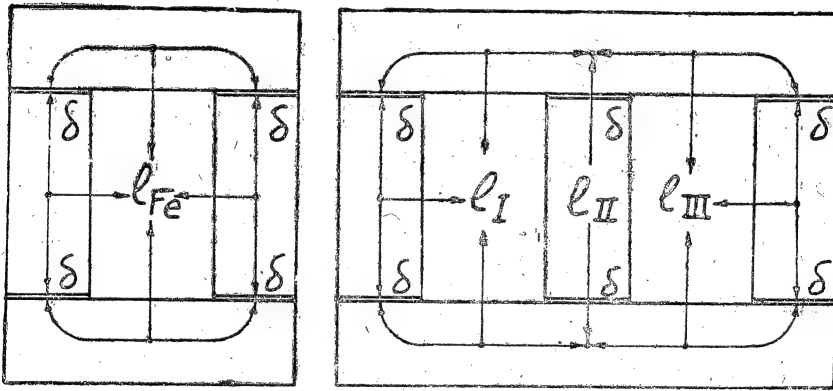
يتم عزل الموصلات التى تتكون منها الملفات ، قبل لفها ، على النحو التالى : يكون العازل الاساسى شريط من الورق سمكه 0.05 مم ، وهو يتحمل حوالى 750 فولت دائمة . ويغطى الموصل بطبقة رقيقة من الورنيش قبل لفه بالورق . ويستخدم شريط من القطن للف الموصل ، لكي يحفظ عليه شريط الورق للعازل ، يكون سمكه 0.1 مم . ويتكون أقل عزل الموصل من طبقتين من الورق ، وفوقها طبقة من شريط القطن ، للاحتفاظ بالعازل على الموصل . ويؤدى الخوف من خطر الضغوط العارمة إلى تقوية اللفات الطرفية فى الملفات ، حتى لا ينهار العازل عليها ، تحت تأثير المجالات الكهربائية الشديدة ، الناشئة عن هذه الضغوط . وتتوقف قيمة نسبة عدد اللفات الطرفية التى تتم تقويتها ، إلى لفات ملف الضغط العالى ، على قيمة الضغط العالى نفسه ، فتقل النسبة بزيادة قيمة الضغط ، بطبيعة الحال . وتنص بعض المواصفات القياسية على أن تكون هذه النسبة حوالى 3 % بالنسبة للضغوط المعتادة (أقل من 100 كيلو فولت) ، وتقل حتى تصل إلى حوالى 1.75 % عند 132 KV ، وتصل إلى حوالى 0.75 % عند 220 KV . هذا وتكون الثقوب أعلى ما يمكن فى الجزء الطرفى ، الذى يمثل 1 % ، ثم 0.58 % ، ثم 0.25 % من اللفات ، على الترتيب .

حساب تيار اللاحول (Calculation of the no load current)

اولا — حساب تيار المغنطة I_{Oh} :

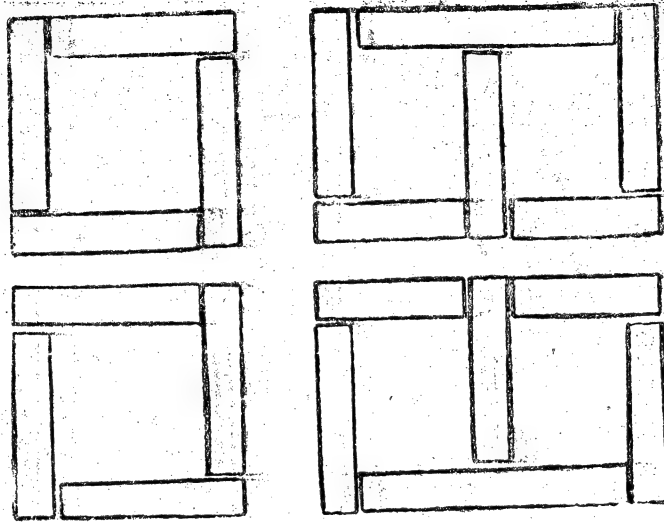
لكي نحصل على قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط B ، فى القلب الحديدى ،

يجب أن يعطى الملف الابتدائي الأمبير لفات AT_1 ، عندما تكون للنهاية العظمى لتيار المغنطة فيه $I_{on} \sqrt{2}$ ، وذلك على أساس أن القيمة الفعالة لتيار المغنطة هي I_{on} ، كما هو مبين في مخطط متجهات المحول شكل (٦-٧) ص ٣٢٧ . وتعمل هذه الأمبير لفات على دفع الفيض المغناطيسي المتبادل Φ_m في الدائرة المغناطيسية التي تتكون من حديد القلب والفك ، والثغرات الهوائية عند كل اتصال بينهما ، كما هو واضح في شكل (٦-١٠) ، بالنسبة للمحول مفرد المرحلة ، والمحول ثلاثي المراحل . ويعمل وجود الثغرات الهوائية ، وتعددتها ، على زيادة قيمة



شكل (٦-١٠)

الأمبير لفات المطلوبة ، وبالتالي زيادة قيمة تيار المغنطة I_{on} ، مما يؤدي إلى تقليل قيمة معامل القدرة للمحول . ولحد من تأثير هذه الثغرات الهوائية ، على هذا النحو ، يراعى في تجميع الرقائق في القلب والفك ، أن تتداخل فيما بينها ، في الطبقات المتتالية ، بحيث تختلف ، تبعاً لذلك ، أطوال الرقائق ، في الفك والقلب ، في كل طبقتين متتاليتين أ ، ب ، كما هو مبين في شكل (٧-١٠) بالنسبة لكل من نوعي المحولات ، مفرد المرحلة ، وثلاثي المراحل .

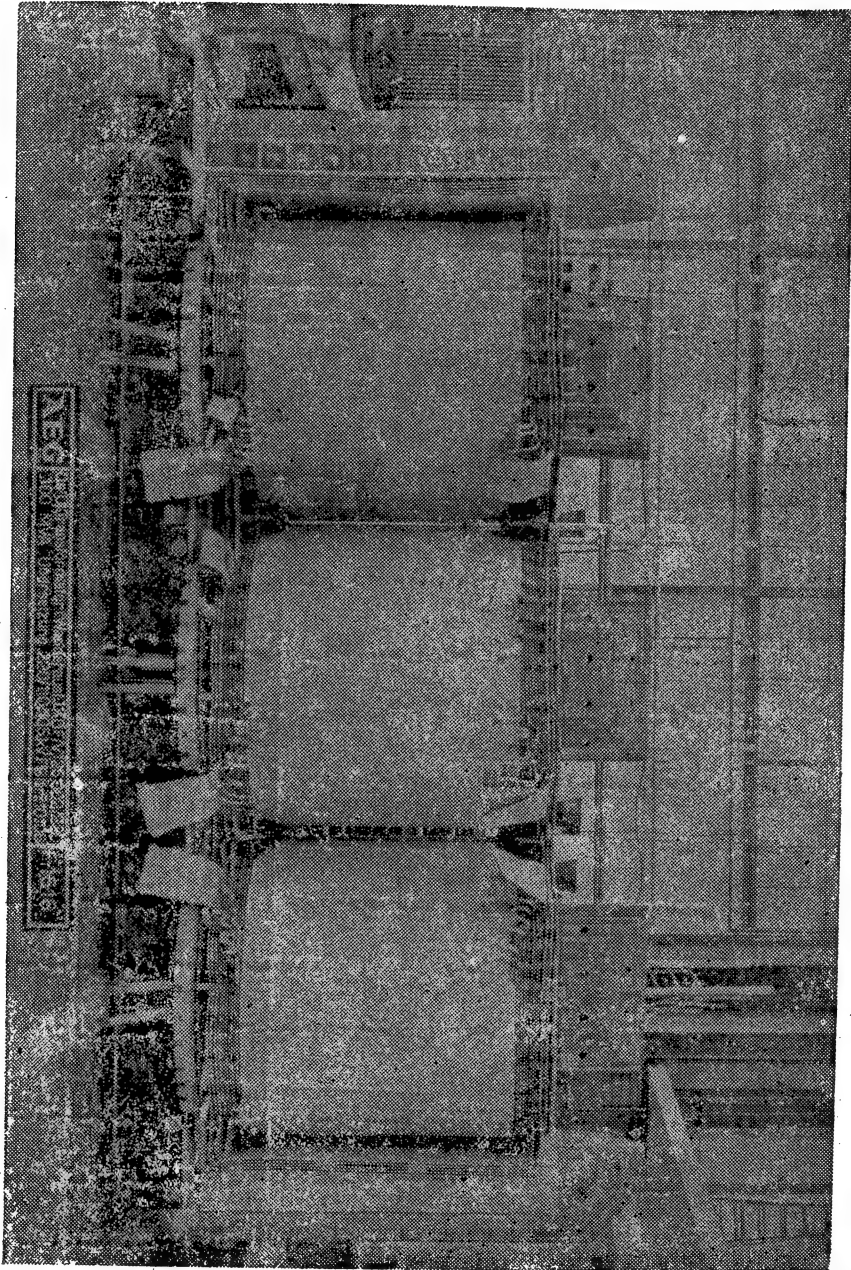


شكل (٧-١٠)

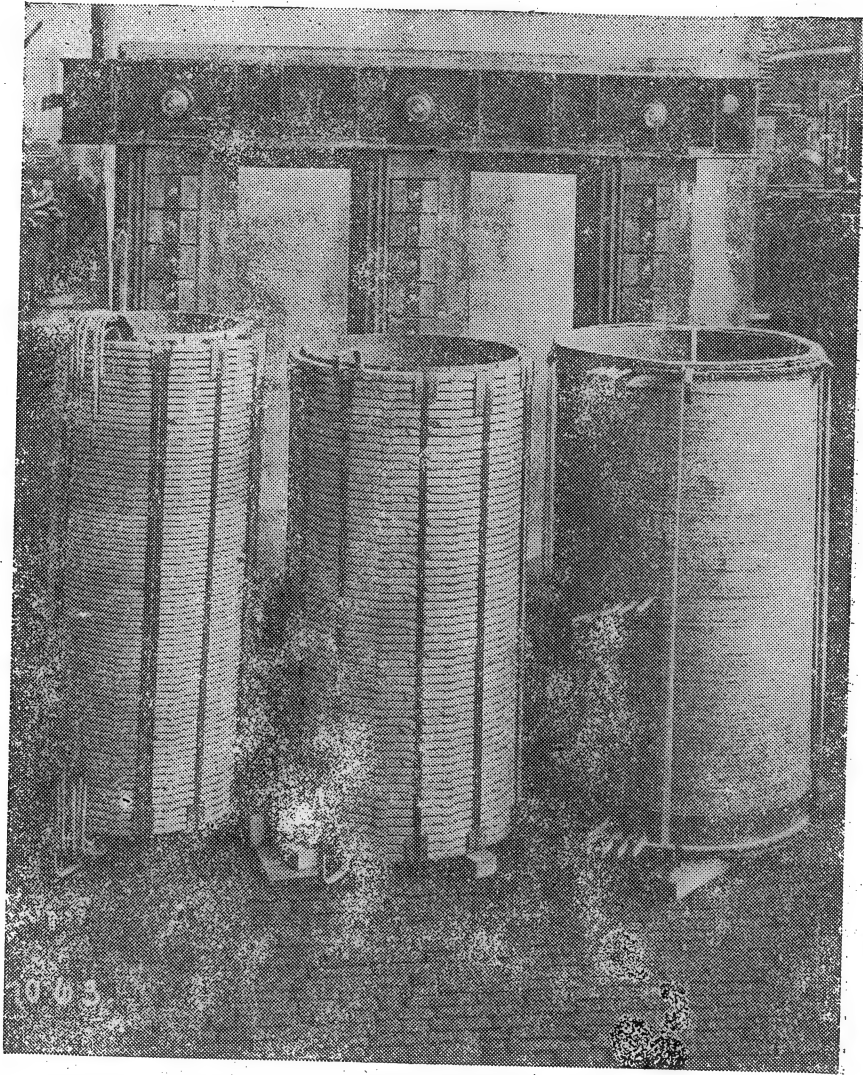
يبين شكل (٨-١٠) محولا ، من المحولات الكبيرة التي تصنعها شركة الـ AEG ، وهو ذو خمسة سيقان (Five core) ، وذلك قبل وضع الفك العلوى ، الذى يتم وضعه بريقة رقيقة ، بحيث تتداخل رقائى الفك بين الاجزاء البارزة من رقائى السيقان . يتم ربط رقائى الفك بعد ذلك ، على النحو المبين بالنسبة للفك الاسفل . أما السيقان ، فيكون ربط رقائىها بنفس الطريقة المربوطة بها رقائى الساق الخامس ، إلى أقصى اليسار من الشكل . لاحظ أن مساحة مقطع كل من الساقين الطرفين تساوى نصف مساحة مقطع كل من السيقان الثلاثة الوسطى .

يبين شكل (٩-١٠) (من نفس الشركة AEG) فى الضغط المنخفض ، والضغط العالى ، الجاهزين ، وذلك قبل وضعهما على القاب الحديدى ، المبين مربوطا ، مع الفك ، وراء الملفين .

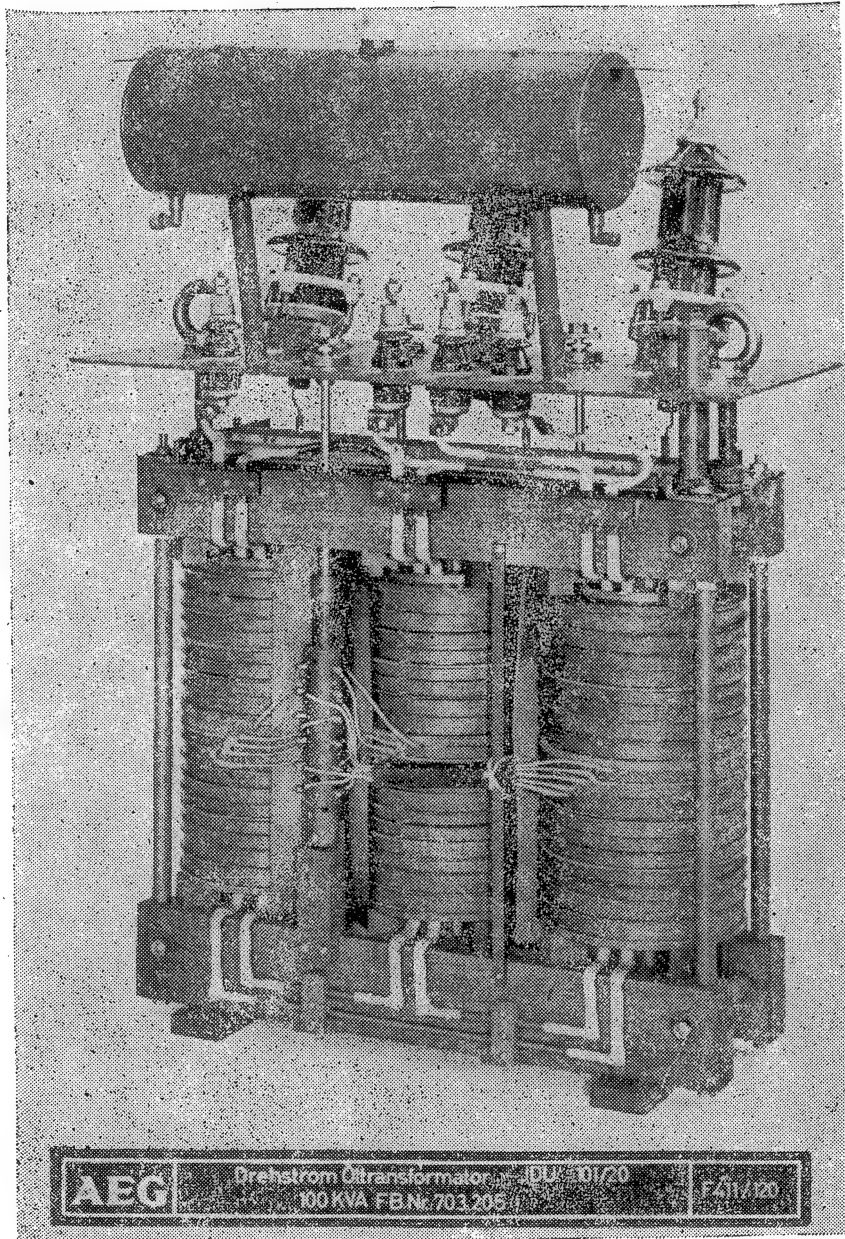
يبين شكل (١٠-١٠) محولا جاهزا (شركة الـ AEG) بملفاته فوق القلب



عجل (١٠-أ)



شکل (۱۰-۱)



الحديدى ، بعد ربط رقائق الفك ، وتركيب كافة الملحقات ، وذلك قبل وضع المحول فى صهر ييج الزيت . والمرجوان تلاحظ كافة التوصلات ، الواضحة وضوحا تاما بالشكل ، والخاصة بتجميع الاجزاء المختلفة المحول .

يكون حساب القيمة الفعالة لتيار المغنطة I_{on} ، من العلاقات المعروفة ، بالنسبة لحسابات الدائرة المغناطيسية (هندسة الآلات الكهربائية ص ٦٩ - ٧٢) ، ع-٤ الى الفحو التالى :

١ - فى المحول مفرد الرحلة :

بالرجوع الى الجزء الايسر من شكل (٦ - ١٠) نجد أن :

$$AT_t = 0,8 B \times 4 \delta + H l_{Fe} \dots (١٠ - ٢٠)$$

حيث δ هى طول الثغرة الهوائية بين الساق والفك بالسنيمترات ، و H معدل انحدار الضغط المغناطيسى فى الرقائق بالأمبير لفة/سم ، المناظر لكثافة الخطوط المغناطيسية B ، على منحني تغطس حديد هذه الرقائق . وتتوافر قيمة δ دلى عوامل كثيرة ، بحيث لا يمكن تحديدها بالضبط ، ولذلك تفرض لها قيمة تجريبية من 0.0035 إلى 0.005 سنيمترا .

$$AT_t = \sqrt{2} \cdot I_{on} \times T_1 \quad , \quad I_{on} = \frac{AT_t}{\sqrt{2} T_1} \dots \dots (١٠ - ٢١)$$

٢ فى المحول ثلاثى المراحل :

سبق أن ذكرنا أن تيار المغنطة لا يكون متساوى القيمة فى المراحل الثلاث ، بسبب اختلاف أطوال مسارات الفيض المغناطيسى $I_{III} = I_{II}$ و I_{II} ، كما هو واضح فى الجزء الايمن من شكل (٦ - ١٠) . وتبعاً لذلك يكون تياراً المغنطة

متساويين في المرحلتين I, III ، على الساقين الطرفيين ، ويكون تيار المغناطيس في المرحلة II ، على الساق الوسطى ، أصغر منهما وعلى هذا الأساس ، نجد أن :

$$I_{ouI} = I_{ouIII} = \frac{0.8 B \times 2 \delta + H l_1}{\sqrt{2} T_1}$$

$$I_{ouII} = \frac{0.8 B \times 2 \delta + H l_{II}}{\sqrt{2} T_1}$$

$$I_{ou} = \frac{2 I_{ouI} + I_{ouII}}{3} \dots \dots \dots (١٠ - ٢٢)$$

ثانياً - حساب تيار المفقودات I_{oa} ، وتيار اللاحمل I_o :

يتم حساب تيار المفقودات I_{oa} ، باعتباره في توافق مرحلي مع ضغط الينبوع V_1 ، وعلى أساس الدائرة المكافئة للمحول المبينة في شكل (٩ - ٧ أ ، ب) على التالي :

١ - في حالة المحول مفرد المرحلة :

$$I_{oa} = \frac{P_{Fe}}{V_1} , I_o = \sqrt{I_{ou}^2 + I_{oa}^2}$$

٢ - في حالة المحول ثلاثي المراحل :

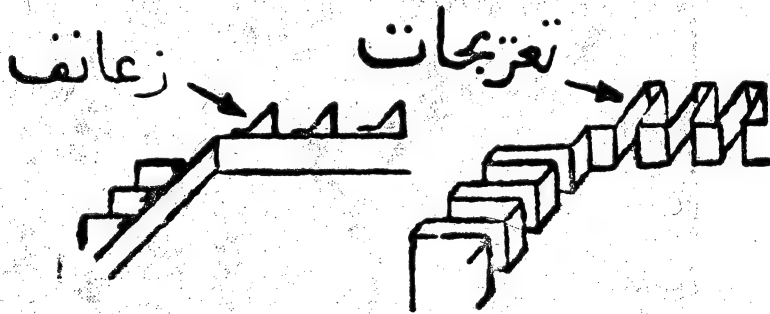
$$I_{oa} = \frac{P_{Fe}}{3V_1} , I_o = \sqrt{I_{ou}^2 + I_{oa}^2} \dots (١٠ - ٢٣)$$

ويجب ألا تزيد قيمة تيار اللاحمل عن 10 % من تيار الحمل الكامل عادة .

صهر بج الزيت : (The oil tank)

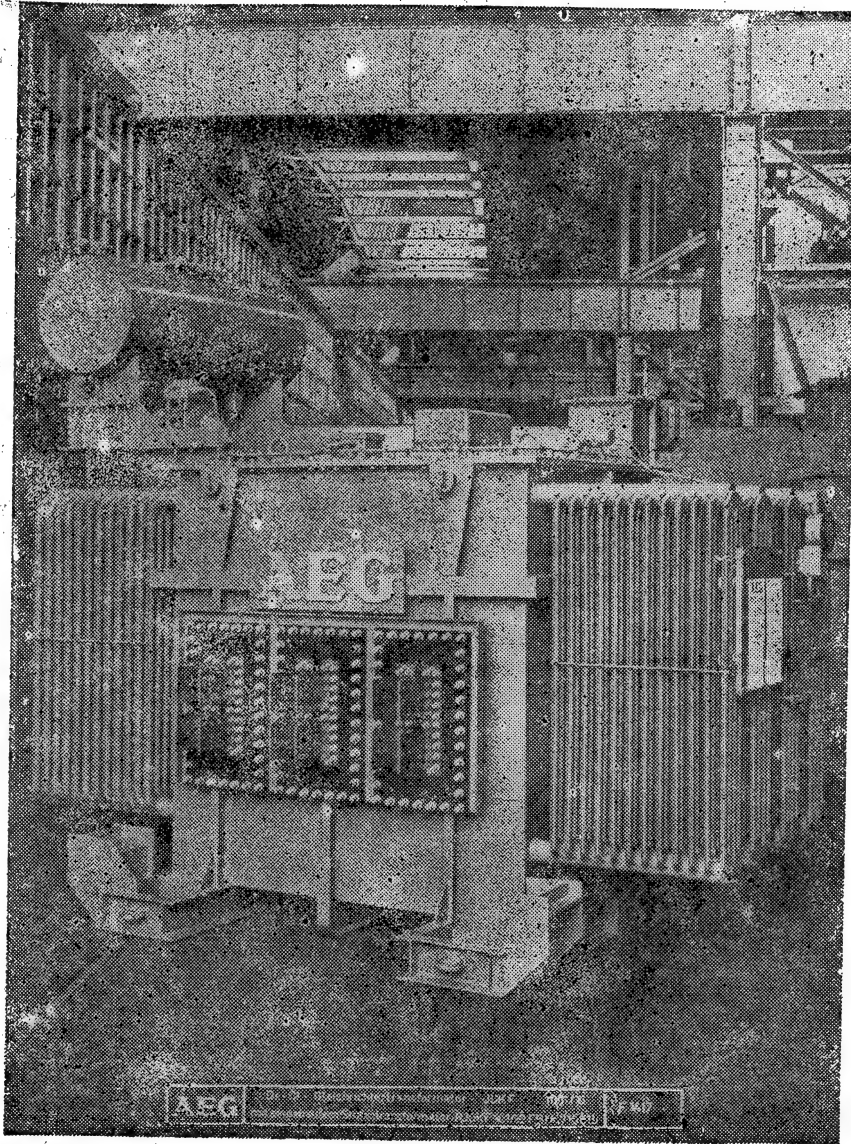
هذا هو الوعاء الحديدي الكبير ، الذي يحتوى على المحول ، بحيث يصبح مغموراً في الزيت ، الذي يحتل به الوعاء . والغرض من غمر المحول في الزيت

جودة عزل المحول أولاً ، بحيث يتم عزله عن المؤثرات التي تتسبب في انهيار العازل على الموصلات ، و حدوث دائرة قصر في الملفات ، وأهمها الرطوبة ، ثم تزويد المحول ثانياً بوسيلة فعالة للتبريد ، عن طريق تبريد الزيت ، الذي يمكن أن يصل إلى الأجزاء الداخلية للملفات ، بفعل تيارات الحمل الحرارية الطبيعية . وقد تترك الزيت يبرد ، بطريقة طبيعية ، عند ملامسته لجدران الصهريج ، المعرضة للجو الخارجى . ويمكن زيادة فاعلية التبريد ، بهذه الطريقة ، بزيادة سطح الصهريج المعرض للجو الخارجى ، وذلك بعمل تعرجات (corrugations) ، فى جدران الصهريج ، أو تزويدها بزعانف (Ribs or Fins) جانبية ، كما هو مبين فى شكل (١١ - ١٠) . كما يمكن الوصول إلى نفس الغرض عن طريق

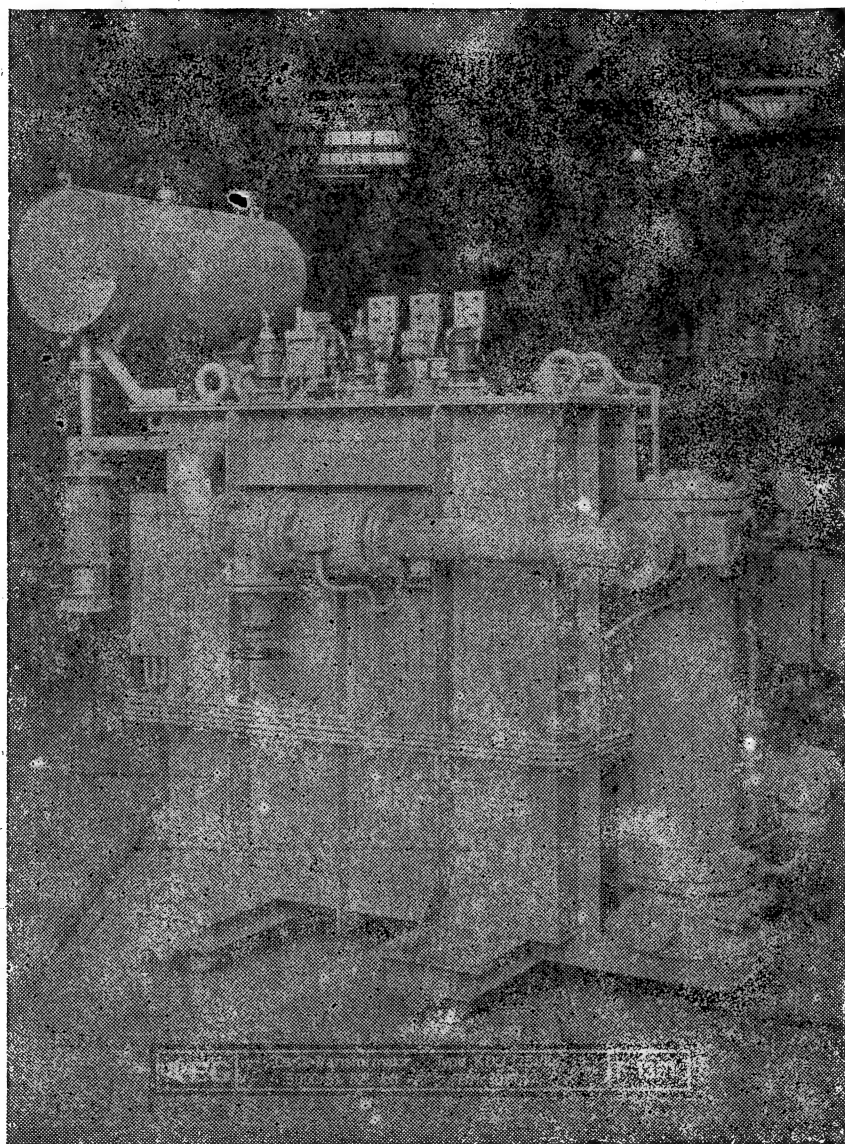


شكل (١١ - ١٠)

تزويد الصهريج بطبقات من الألواح الجانبية ، التي تحمل الزيت الساخن من قبة الصهريج ، لكي يبرد أثناء نزوله عن طريقها ، ثم يدخل الصهريج عند قاعه ، بارداً ، ويسخن فى أثناء مروره على أجزاء المحول ، بفعل تيارات الحمل الطبيعى ، من القاع إلى القمة . يبين شكل (١٢ - ١٠) أحد المحولات الـ AEG من هذا النوع .



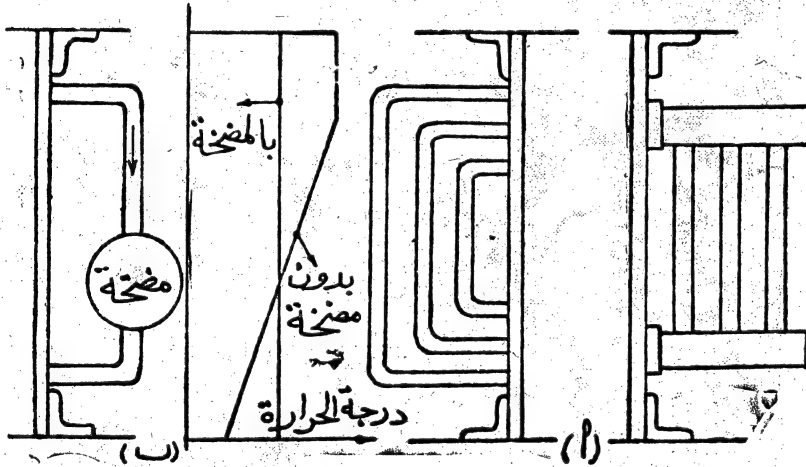
شکل (۱۰-۱۶)



شکل (۱۰-۱۳) -

هذا ويمكن تبريد الزيت بالماء ، في أثناء عمل دورة صناعية له ، باستخدام مضخة خاصة تابع بالمحول ، وهي للوجود على يمينه في شكل (١٣ - ١٠) ، الخاص بمحول من هذا النوع لشركة AEG .

يبين شكل (١٤ - ١٠) كيف ترتب الانابيب ، وطريقة انضمامها إلى جدار الصهرج ، كما يبين شكل (١٤ - ١٠ ب) توزيع درجات حرارة الزيت على مدى ارتفاع الصهرج ، عند استخدام المضخة ، وبدونها ، ويتضح فيه كيف يؤدي



شكل (١٤ - ١٠)

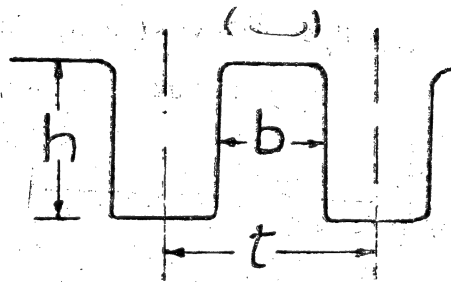
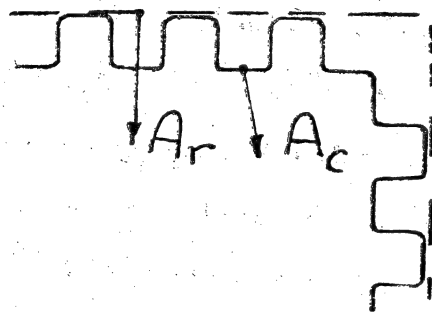
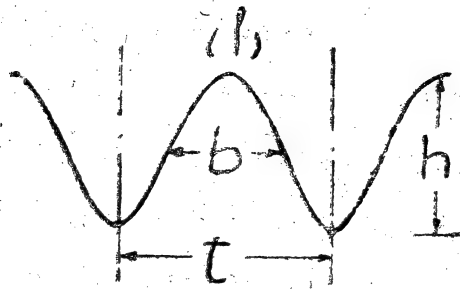
استخدام المضخة إلى تساوى درجة حرارة الزيت على مدى ارتفاع الصهرج تقريباً . نستطيع ، بناء على ذلك ، تصميم المحول على أساس ارتفاع في درجة حرارة الزيت ، عن درجة حرارة الجو المحيط بالمحول ، عند استخدام المضخة ، يزيد عن ارتفاع درجة الحرارة ، عند عدم استخدام المضخة . لذلك نفترض زيادة في درجة الحرارة Δt تساوى 40°C ، في حالة عدم استخدام المضخة ، وتساوى

48°C في حالة استخدامها . ونتيجة لتحديد Δt ، بالرقم المعطى ، أو بغيره ، على حسب نوع المواد المستخدمة في العزل ، وتبعاً للمواصفات المتداولة ، نستطيع تحديد مساحة سطح التبريد اللازم على النحو التالي : إذا فرضنا أن السطح المعرض للجو الخارجى (سواء كان سطح الصهريج ، بالتمريجات ، أو بدونها ، أو سطح الانابيب) ، الذى تنتقل منه الحرارة بالحمل (convection) أو التوصيل (conduction) هو A_c من الامتار المربعة . والذى تنتقل منه الحرارة بالإشعاع (radiation) هو A_r من الامتار المربعة ، وبفرض أن القيمة التجريبية لمعامل انتقال الحرارة بالحمل والتوصيل u_c هى من 7 (في حالة المحولات الكبيرة) إلى 8 (في حالة المحولات الصغيرة) وات لكل متر مربع وفرق درجة حرارة واحدة ($u_c = 7 - 8 \text{ W/}^\circ\text{C.m}^2$) ، وأن القيمة التجريبية لمعامل انتقال الحرارة بالإشعاع u_r هى حوالى 6 وات لكل متر مربع وفرق درجة حرارة واحدة ($u_r = 6 \text{ W/}^\circ\text{C.m}^2$) ، وباعتبار أن P_v هى المفقودات الكلية في المحول (الحديد والنحاس معا) ، نجد أن :

$$\Delta t = \frac{P_v}{u_r A_r + u_c A_c} \approx \frac{P_v}{6A_r + (7-8)A_c} \dots\dots (١٠-٢٤)$$

يكون حساب A_r على أساس المساحة الخالصة للسطح ، التى لا تتأثر بالإعكاسات ، أما A_c فهى عبارة عن السطح الكلى الملامس للجو الخارجى ، كما هو مبين في شكل (١٥ - ١٠) . وعند حساب كل من A_r ، A_c لا يدخل فيها مساحة سطح غطاء الصهريج وقاعه ، فيميلان للحصول على نتائج مأمونة العاقبة ، بالنسبة لإرتفاع درجة الحرارة ، على قدر الإمكان .

يكون تحديد عدد الانابيب ، وأقطارها ، ومن ثم مساحة سطوحها الخارجية



شكل (١٥-١٠)

على اسامى المساحتين A_r ، A_c . أما بالنسبة لتعريجات جدار الصهريج ، فيكون عرض قناة الزيت a وعرض مجرى الهواء b ، وعمق التعريجات h ، على نحو ما هو مبين فى شكل (١٥-١٠) ، فى الحدود الآتية :

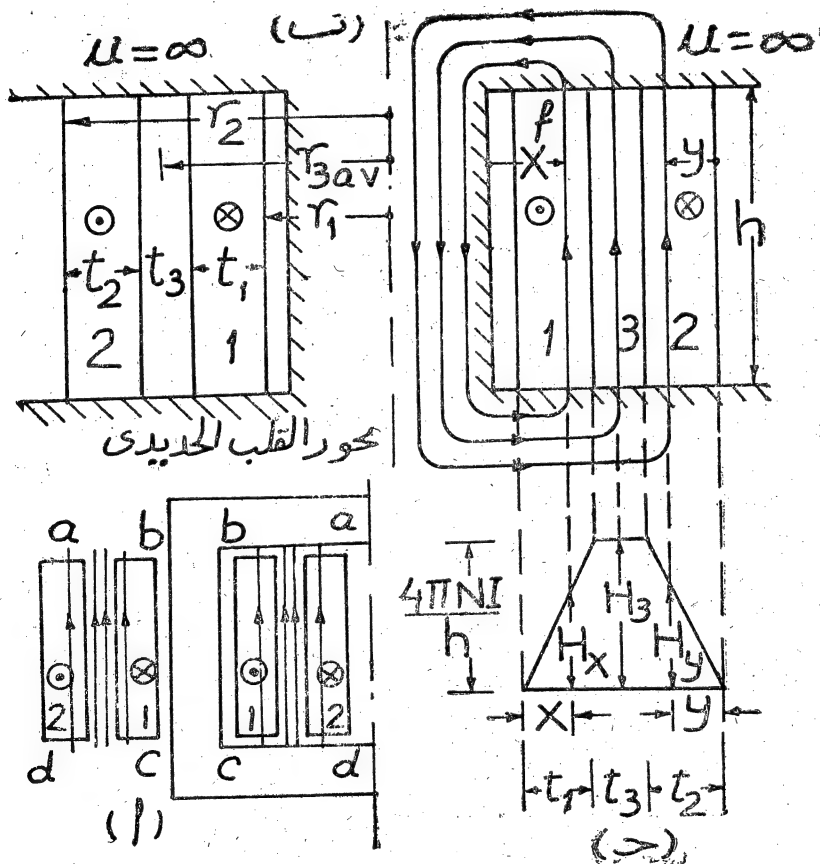
$$a = 5 - 30 \text{ mm} , \quad b = 30 - 70 \text{ mm} , \quad h \leq 400 \text{ mm}$$

وبذلك نجد أن عرض مجرى الهواء يكون أكبر من عرض قناة الزيت لزيادة فاعلية التبريد .

(Transformer impedance) معاوقة المحول

(Short circuit voltage) وضبط القصير

تتكون معاوقة المحول من المقاومة العادية للملفات ، وممانعة تمريرها . ويمكن



شكل (١٦-١٠)

حساب مقاومة كل من الملفين الابتدائي والثانوى ، بمعلومية مساحة مقطع السلك فى كل منها ، والطول الكلى للسلك المستعمل ومقاومته النوعية ، وذلك عند درجة حرارة التشغيل ، عند الحمل الكامل ، باعتبار الزيادة فى درجة حرارة الملفات حوالى 60°C . ويراعى أن المقاومة مع التيار المتردد تكون أكبر منها مع التيار المستمر ، وهى المقاومة المحسوبة على النحو المشار اليه ، وذلك بسبب الظاهرة القشرية . فالملف يمكن الاسلاك بمجموعة (Stranded) للتخلص من تلك الظاهرة ، تزداد المقاومة المحسوبة ، بمعامل تجريبي ، تتوقف قيمته على قيمة مساحة مقطع السلك . ويمكن استخدام المعادلة (٣١ - ٦) ص ٣١ ، على النحو المشار اليه . هذا ويمكن حساب المقاومة الكلية المكافئة ، منسوبة إلى أى من الملفين ، بعد ذلك بسهولة .

تتوقف قيمة ممانعة التسرب لكل ملف على الفيض المتسرب حوله ، والمتشابك معه ، وكذلك على قيمة السماح المغناطيسى لمسار هذا الفيض . وسوف نشرح فيما يلى ، على هذا الأساس ، كيفية حساب الممانعة الكلية المكافئة ، منسوبة إلى أحد الملفين :

يبين شكل (١٦ - ١٠ ب) الملفين الابتدائي (1) ، والثانوى (2) ، للدحول مفرد المرحلة ، أو فى مرحلة محول ثلاثى المراحل ، باعتبار أن الحديد حولهما ذو معامل نفاذ مغناطيسى لانهائى (infinite magnetic permeability) ، وأن المقاومة المغناطيسية للفيض المتسرب تتركز ، بناء على ذلك ، فى المسارات الهوائية . إذا كان التيار المار فى أحد الملفين ، الذى عدد لفاته T ، هو I ، فإن القوة الدافعة المغناطيسية ، التى ينجم عنها مرور الفيض المتسرب ، لكل من الملفين ، الابتدائي والثانوى ، تصبح $4\pi TI$ جابرت ($I_1 T_1 = I_2 T_2 = IT$) .

ويمكننا، في هذه الحالة، اعتبار أن عمانية التسرب المكافئة ناتجة عن الفيض المتسرب،
الذى ينشأ حول الملفين، بوضعهما على الساق الحديدى، كما فى شكل (١٦—١٠)
(ب)، عندما يوصلان دلى التوالى، بحيث تكون قوتاها الدافعتان المغناطيسيتان
متضادتين. نحمد، على هذا الأساس، أن الخطوط المغناطيسية فى المسار رقم 1
تشابك مع الجزء x / ϵ_1 من لفات الملف الابتدائى. وبذلك تكون قيمة القوة
الدافعة المغناطيسية F_x ، التى تدفع الخطوط المغناطيسية فى هذا المسار عبارة
عن :

$$F_x = \frac{4 \pi T I x}{\epsilon_1} \dots\dots\dots (١٠-٢٥)$$

وتتحقق المعادلة (١٠-٢٥) باستخدام مجموعة الوحدات غير المنسقة،
باعتبار أن المسار فى الهواء (هندسة الآلات الكهربائية ص ٨٠ إلى ٨٤).
وتكون قيمة معدل اعداد الضغط المغناطيسى H_x حول المسار 1 ثابتة،
ومقدارها بالأورستد هو :

$$H = \frac{F_x}{h} = \frac{4 \pi T I x}{h \epsilon_1} \dots\dots\dots (١٠-٢٦)$$

تكون قيمة H_x صفراً عند السطح الداخلى للملف الابتدائى ($x = 0$)
كما أنها تكون أكبر ما يمكن، وتساوى $4 \pi T I / h$ ، عند السطح الخارجى لهذا
الملف ($x = \epsilon_1$)، حيث ϵ_1 هو سمك الملف الابتدائى بالسنتيمترات، كما هو
مبين فى شكل (١٦—١٠) (ب) مع بقية الأبعاد الموضحة، وهى سمك الملف
الثانوى و ϵ_2 عرض الفراخ بين الملفين، من النحاس العارى إلى النحاس العارى
و h ارتفاع الملفين (بفرض أنهما متساويان فى الطول) و ϵ_1 نصف قطر الدائرة
من محور الساق الحديدى إلى السطح الداخلى للملف الابتدائى (على النحاس العارى)

و r_2 نصف قطر الدائرة من محور الساق الحديدى إلى السطح الخارجى للملف الثانوى (على النحاس العارى أيضا) و r_{3av} نصف قطر الدائرة من محور الساق الحديدى حتى منتصف الفراغ بين الملفين .

تكون قيمة القوة الدافعة المغناطيسية H_3 حول أى مسار مثل 3 فى الفراغ بين الملفين ، ثابتة وتساوى $4 \pi TI/h$ (تساوى $4 \pi NI/h$ فى شكل (١٦-١٠)) باعتبار أن N هى نفسها عدد اللفات (T) . ونظرا لأن القوة الدافعة المغناطيسية للملف 2 مضادة للقوة المغناطيسية الدافعة للملف 1 ، كما سبق ذكره ، تقل قيمة القوة الدافعة المغناطيسية الكلية المؤثرة ، للملفين معا ، فى أى مسار داخل الملف الثانوى ، مثل المسار 2 ، حتى تصل قيمتها إلى الصفر ، عند السطح الخارجى لهذا الملف ، كما هو مبين فى شكل (١٦-١٠) . ويمكن ، بناء على ذلك ، حساب قيمة القوة الدافعة المغناطيسية H_y حول المسار 2 بوضع y بدلا من x فى المعادلة (٢٦-١٠) ، فنجد أن :

$$H_y = \frac{F_y}{h} = \frac{4 \pi T I y}{ht_2} \dots\dots\dots (٢٧-١٠)$$

يمكننا حساب قيمة معامل الحث الذاتى المكافئ L_{eq} ، الذى تحسب به قيمة ممانعة التسرب المكافئة X_{eq} ، من حساب الطاقة المخزنة فى المجال المغناطيسى للتسرب ، الذى يحتمل ، بناء على اقتراحنا أن معامل النفاذ للحديد لانهاى ، الفراغ الكائن بين السطح الداخلى للملف الابتدائى والسطح الخارجى للملف الثانوى (من النحاس العارى إلى النحاس العارى) ، وذلك على أساس أن قيمة الطاقة المخزنة تساوى $\frac{1}{2} I^2 L_{eq}$ ، عندما تكون قيمة التيار الفعالة I . بالرجوع إلى كتاب هندسة الآلات الكهربائية ص ١١٢ المعادلة (٥٧-٢) نجد أن الطاقة الكهربائية ،

التي تختزن في كل سنتيمتر مكعب في المجال المغناطيسي ، عندما تزداد قيمة كثافة الخطوط المغناطيسية من صفر إلى B عبارة عن $\frac{1}{4\pi} \int_0^B H dB$ وتكون الطاقة النوعية المخزنة في الهواء بالأرج لكل سنتيمتر مكعب عبارة عن :

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^B B dB = \frac{B^2}{8\pi} = \frac{H^2}{8\pi} \dots (١٠-٢٨)$$

نظرا لأن قيمة H متغيرة من صفر إلى H_3 في المسافة من $x=0$ إلى $x=r_1$ وثابتة عند القيمة H_3 في المسافة r_3 ، ثم متغيرة من القيمة H_3 إلى الصفر في المسافة r_2 ، يجب اجراء التكامل السابق على ثلاث دفعات ، تبعا لذلك ، وجمع النتائج في النهاية . ويكون الحساب في خلال ذلك كله على أساس عنصر الطاقة المخزنة dW_x ، في حلقة اسطوانية ، ارتفاعها h ، وسماها dx ، ونصف قطرها (r_1+x) حيث تكون شدة المجال المغناطيسي H_x . يكون حجم المجال المغناطيسي ، الذي تحصره هذه الحلقة في سماها dx ، عبارة عن $2\pi (r_1+x) h dx$. وبذلك نجد أن للطاقة المخزنة في المجال المغناطيسي ، على مدى سمك الحلقة ، عبارة عن :

$$\begin{aligned} dW_x &= \frac{H_x^2}{8\pi} \times 2\pi (r_1+x) h dx \\ &= \frac{4\pi^2 I^2 T^2}{h t_1^2} (r_1+x) x^2 dx \dots\dots\dots (١٠-٢٩) \end{aligned}$$

ويكون مقدار الطاقة المخزنة W_1 في المجال المغناطيسي ، على مدى سمك الملف الابتدائي t_1 ، عبارة عن :

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{4\pi^2 I^2 T^2}{h t_1^2} \int_0^{t_1} (r_1+x) x^2 dx \\ &= \frac{4\pi^2 I^2 T^2}{h} \left(\frac{r_1}{3} + \frac{t_1}{4} \right) t_1 \dots\dots\dots (١٠-٣٠) \end{aligned}$$

كذلك يكون مقدار الطاقة المخزنة W_2 ، في المجال المغناطيسى ، على مدى سمك الملف الثانوى t_2 ، عبارة عن :

$$W_2 = \frac{4 \pi^2 I^2 T^2}{h t_2^2} \int_0^{t_2} (r_2 - y) y^2 dy$$

$$= \frac{4 \pi^2 I^2 T^2}{h} \left(\frac{r_2}{3} - \frac{t_2}{4} \right) t_2 \dots\dots (١٠-٣١)$$

كما يكون مقدار الطاقة المخزنة W_3 ، في المجال المغناطيسى ، على مدى المسافة بين الملفين t_3 ، حيث تكون شدة المجال H_3 ثابتة القيمة ، عبارة عن :

$$W_3 = \frac{H_3^2}{8\pi} \times 2 \pi r_{3av} t_3 h$$

$$= \frac{4 \pi^2 I^2 T^2}{h} r_{3av} t_3 \dots\dots\dots (١٠-٣٢)$$

وبمساواة الطاقة الكلية المخزنة بالقيمة $\frac{1}{2} I^2 L_{eq}$ نحصل على قيمة L_{eq} ، حيث :

$$L_{eq} = \frac{2}{I^2} (W_1 + W_2 + W_3)$$

$$= \frac{8 \pi^2 T^2}{h} \left[\left(\frac{r_1}{3} + \frac{t_1}{4} \right) t_1 \right.$$

$$\left. + \left(\frac{r_2}{3} - \frac{t_2}{4} \right) t_2 + r_{3av} t_3 \right] \dots\dots (١٠-٣٣)$$

وتكون L_{eq} ، كما تعطىها المعادلة (١٠-٣٣) بالوحدات الكهرومغناطيسية (e. m. u.) المطلقة ، ولكي نحصل عليها بالوحدات العملية ، وهى الهرى ، يجب أن نضرب المعادلة في 10^{-9} . هذا ويمكن تبسيط المعادلة بتقريبها وذلك

باعتبار أن $\frac{r_1}{3} + \frac{t_1}{4}$ يساوى $\frac{r_{1av}}{3}$ ، حيث r_{1av} هو نصف القطر من محور الساق إلى منتصف الملف الابتدائي تقريبا ، وكذلك أن $\frac{r_2}{3} - \frac{t_2}{4}$ يساوى $\frac{r_{2av}}{3}$ ، حيث r_{2av} هو نصف القطر من محور الساق إلى منتصف الملف الثانوى تقريبا . وعلى هذا الأساس نجد أن :

$$L_{eq} = \frac{8 \pi^2 T^2 \times 10^{-9}}{h} \left(\frac{r_{1av} t_1}{3} + \frac{r_{2av} t_2}{3} + r_{3av} t_3 \right) \dots \dots \dots (١٠-٣٤)$$

ونحصل على قيمة المساواة المكافئة بالضرب في $2 \pi f$ ($= 314$ إذا كانت $f=50$) . فإذا وضعنا T تساوى T_1 ، نحصل على قيمة الممانعة المكافئة منسوبة إلى الملف الابتدائي ، وإذا وضعنا T تساوى T_2 ، نحصل على قيمة الممانعة المكافئة منسوبة إلى الملف الثانوى .

$$X_{1eq} = \frac{16 \pi^3 T_1^2 f \times 10^{-9}}{h} \left(\frac{r_{1av} t_1}{3} + \frac{r_{2av} t_2}{3} + r_{3av} t_3 \right) \Omega$$

$$X_{2eq} = \frac{16 \pi^3 T_2^2 f \times 10^{-9}}{h} \left(\frac{r_{1av} t_1}{3} + \frac{r_{2av} t_2}{3} + r_{3av} t_3 \right) \Omega \dots \dots \dots (١٠-٣٥)$$

نحصل على قيمة أعلى قليلا من القيمة الحقيقية لممانعة التسرب ، وذلك بسبب المفروضات التى تم على أساسها استنتاج المعادلتين (٣٥ - ١٠) ، ولذلك يستخدم معامل تخريبي أقل من الواحد الصحيح ، لتصحیح قيمتى X_{1eq} ، X_{2eq} ، اللتين

حصلنا عليها . وتتوقف قيمة هذا المعامل التجريبي على الخبرة السابقة في صناعة المحولات ، وتختلف قيمته من مصنع إلى آخر .

تتوقف قيمة ضغط القصر أساسا على قيمة الممانعة المكافئة . وضغط القصر هو عبارة عن الضغط ، اللازم توصيله على طرفي الملف الابتدائي ، لتمرير تيار قصر في المحول I_{sc} ، عندما يكون طرفا الملف الثانوي مقصورين ، يساوي تيار الحمل الكامل I_1 . وعلى هذا الأساس تتحدد قيمة ضغط القصر V_{sc} كما يأتي :

$$V_{sc} = I_{sc} Z_{eq} = I_1 Z_{1eq} = I_1 \sqrt{R_{1eq}^2 + X_{1eq}^2} \dots\dots (١٠-٣٦)$$

ويمكن تعديل قيمة ضغط القصر ، عن طريق تغيير قيمة X_{1eq} ، وذلك باعادة ترتيب اللفات ، في كل من الملفين الابتدائي والثانوي ، بحيث تتغير قيم كل من r_{1av} ، r_{2av} ، r_{3av} ، بما يحقق الغرض المطلوب ،

مثال (١) :

Find suitable dimensions for the iron core and window as well as the number of turns of the primary and secondary copper windings, and the window space factor for the following 3 phase distribution transformer : 160 KVA, 6000/525 V, 50 c.p.s., star/star, oil immersed. The full load efficiency at 0.8 power factor is to be 97.6% and the total iron losses 735 W. The specific iron loss for the sheets used is 1.35 watts/kg at 10 kilo — gauss and 50 c.p.s.

Allow a maximum flux density in the iron core of 12500 lines/sq. cm and a current density of 2.8 amps/sq. mm in the copper windings. Take specific weight of iron 7.8 gms/cubic cm, $C = 37$, and a factor of

1.1 to allow for additional iron losses.

$$P_v = P_{Fe} + P_{cu} = \frac{160 \times 0.8}{0.976} \times 0.024 = 3146 \text{ W}$$

$$P_{cu} = 3146 - 735 = 2411 \text{ W}$$

$$\beta = \frac{P_{Fe}}{P_{cu}} = \frac{735}{2411} = 0.305$$

$$P_{Fe} = 1.1 \times \left(\frac{12500}{10000} \right)^2 \times 1.35 = 2.31 \text{ W/Kg}$$

$$P_{cu} = 2.7 j^2 = 2.7 \times 7.82 = 21.12 \text{ W/Kg} , \frac{P_{cu}}{P_{Fe}} = 9.16$$

$$A_{Fe} = 37 \sqrt{\frac{160 \times 0.305 \times 9.16 \times 10^5}{50 \times 12500 \times 2.8}} = 187 \text{ cm}^2$$

$$E_t = \frac{E}{T} = 4.44 \times 50 \times 12500 \times 187 \times 10^{-8} = 5.18 \text{ V/turn}$$

باعتبار أن نسبة مساحة الحديد الصافي إلى مساحة الدائرة المحيطة 0.72 :

$$d = \sqrt{\frac{187}{0.72} \times \frac{4}{\pi}} = 18.2 \text{ cms}$$

ويكون عرض الدرجة الأولى a في القلب الحديدي ، ذي ثلاث الدرجات ،

وعرض الدرجة الثانية b ، وعرض الدرجة الثالثة c ، عبارة عن :

$$a = 0.427 \times 18.2 = 7.75 \text{ cms}$$

$$b = 0.707 \times 18.2 = 12.88 \text{ cms}$$

$$c = 0.905 \times 18.2 = 16.5 \text{ cms}$$

مساحة الحديد الكلية بالعازل وقناة التبريد :

$$\frac{187}{0.72} \times 0.86 = 223 \text{ cm}^2$$

بأخذ قناة تبريد ، يمر فيها الزيت ، عرضها 0.9 سم ، تكون مساحتها 14.95 سم^٢ ، وبذلك تصبح مساحة الحديد ، والعازل بين الرقائق 208.06 - 14.95 = 223 سم^٢ .

$$A_{Fe} = 208 \times 0.9 = 187 \text{ cm}^2$$

$$G_{Fe} = \frac{735}{2.31} = 318.5 \text{ Kg}$$

$$G_{cu} = \frac{2411}{21.15} = 114 \text{ Kg}$$

$$\alpha = \frac{G_{Fe}}{G_{cu}} = \frac{318.5}{114} = 2.79 \quad (2 \rightarrow 4)$$

$$V_{Fe} = A_{Fe} \times l_{Fe} = \frac{318.5 \times 10^3}{7.8} = 4.07 \times 10^4 \text{ cm}^3$$

$$l_{Fe} = \frac{4.07 \times 10^4}{187} = 218 \text{ cms}$$

$$l_c = 3H = \frac{l_{Fe}}{2} , \quad H = \frac{l_{Fe}}{6} = 36.3 \text{ cms}$$

$$l_y = \frac{l_{Fe}}{2} = 2 \left(2C + d + \frac{\pi d}{2} \right)$$

$$C = \frac{218}{8} - \frac{18.2}{2} - \frac{\pi \times 18.2}{4} = 1.72 \text{ cms}$$

$$T_2 \cong \frac{525}{\sqrt{3 \times 5.18}} \cong 58.4 \rightarrow T_2 = 58$$

$$T_1 \cong \frac{6000}{\sqrt{3 \times 5.18}} \cong 668 \rightarrow T_1 = 66 \times \frac{58}{58.4} = 663$$

$$I_1 = \frac{160 \times 1000}{\sqrt{3} \times 6000} = 15.4 \text{ A} , \quad a_1 = \frac{15.4}{2.8} = 5.5 \text{ mm}^2$$

$$I_2 = \frac{160 \times 1000}{\sqrt{3} \times 525} = 176 \text{ A} , \quad a_2 = \frac{176}{2.8} = 62.8 \text{ mm}^2$$

$$K_w = \frac{5.5 \times 2 \times 663 + 62.8 \times 2 \times 58}{363 \times 167.2} = 0.24$$

: (۲) مثال

A 450 KVA, 10000/231 V, 50 c/s, 3 phase, core type, star/delta, oil immersed transformer has a maximum efficiency of 97.9 %, when it is delivering 40 % of its full load rating at 0.8 power factor lagging. The specific iron loss is 1.1 watts/Kg at 10 kilogauss and 50 c/s. while the current density in the primary and secondary windings is 2.9 amperes/sq. mm. The maximum flux density in the iron core and yoke is 12000 lines/sq. cm and the specific weight of iron is 7.8 grms/cubic cm, Take the constant $C = 40$, an additional iron loss factor of 1.1 and assume a filling factor for the iron core such that $A_{Fe} = 0.7 d^2$. It is required to find the cross — sectional area A_{Fe} of the iron core, and the window space factor for the transformer.

$$P_v (\text{at } \eta_m) = \frac{450 \times 0.8}{0.979} \times 0.021 \times 0.4 = 3.1 \text{ KW}$$

$$P_{Fe} = x^2 P_{cu} = \frac{P_v}{2} (\text{at } \eta_m) = \frac{3.1}{2} = 1.55 \text{ KW}$$

$$x^2 = \left(\frac{I_m}{I_{f,l}} \right)^2 = (0.4)^2 = 0.16 , \quad \beta = \frac{P_{Fe}}{P_{cu}} = 0.16$$

$$P_{cu} (\text{عند الحمل الكلي}) = \frac{P_{Fe}}{x^2} = \frac{1.55}{0.16} = 9.7 \text{ KW}$$

$$p_{Fe} = 1.1 \times 1.44 \times 1.1 = 1.74 \text{ W/Kg}$$

$$P_{cu} = 2.7 \times (2.9)^2 = 22.7 \text{ W/Kg} , \quad \frac{p_{cu}}{p_{Fe}} = 13.05$$

$$A_{Fe} = 40 \sqrt{\frac{450 \times 0.16 \times 13.06 \times 10^5}{50 \times 12000 \times 2.9}} = 294 \text{ cm}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{294}{0.7}} = 20.5 \text{ cms}$$

$$G_{Fe} = \frac{1550}{1.74} = 890 \text{ Kgs} , \quad G_{cu} = \frac{9700}{22.7} = 427 \text{ Kgs}$$

$$\alpha = \frac{890}{427} \approx 2.1 , \quad (\alpha = 2 - 4)$$

$$v_{Fe} = \frac{890}{7.8} \times 10^3 = 114200 \text{ cm}^3$$

$$l_{Fe} = \frac{114200}{294} = 388 \text{ cms}$$

$$l_y = l_c = \frac{388}{2} = 194 \text{ cms} , \quad H = \frac{l_c}{3} = 64.7 \text{ cms}$$

$$C = \frac{388}{8} - \frac{20.5}{2} - \frac{\pi \times 20.5}{4} = 21.9 \text{ cms}$$

$$I_1 = \frac{450 \times 1000}{\sqrt{3} \times 10000} = 26 \text{ A} , \quad I_2 = \frac{450 \times 1000}{3 \times 231} = 649 \text{ A}$$

$$a_1 = \frac{26}{2.9} = 8.97 \text{ mm}^2 , \quad a_2 = \frac{649}{2.9} = 224 \text{ mm}^2$$

$$E_t = 4.44 \times 50 \times 12000 \times 294 \times 10^{-8} = 7.83 \text{ V/turn}$$

$$T_1 = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 7.83} \approx 737$$

$$T_2 = \frac{231}{7.83} \approx 29.5$$

$$T_2 = 30, \quad T_1 = 737 \times \frac{30}{29.5} = 750$$

$$\delta = \frac{2 (8.97 \times 750 + 224 \times 30)}{21.9 \times 64.7} = 0.19$$

مسائل على الباب العاشر

- 1 - Calculate the approximate overall dimensions for a 300 K.V.A., 6600/440 volt, 50 cycle, 3 phase type transformer. The following data may be used :

e.m.f. per turn 9 volts.

maximum flux density 130000 lines per sq. cm.

current density 2.5 amperes per sq. mm.

wiudow space factor = 0.3

overall height = overall width.

- 2 - Determiue the dimensions of the core for a 200 KVA, 3300/480 V, single phase core type transformer to operate at a frequency of 50 cycles per second, assuming the following data :

Maximum flux density, 12000 lines per sq. cm, current density, 280 amp per sq. cm. volts per turn, 8; area factor for the 3 stepped core, 0.6, height of wiudow/ width of wiudow, 2, window space factor, 0.28.

- 3 - Find suitable dimensions of the iron core and window

as well as the number of turns of the primary and secondary copper windings and their cross sectional areas for the following transformer ;

200 KVA, 10000/400 volt, 50 c/s, star/star, oil immersed.

The specific iron loss for the sheets used is 1.3 watts/kg.

at 10 kilo gauss and 50 c/s. Efficiency of the transformer

at full load and 0.8 power factor is to be 97.5 % with

a total iron loss of 1.0 KW. Assume a flux density

in the iron core of 13000 lines/sq. cm. and a current

density in the windings of 2.8 amps/sq. mm. $C = 35$,

$\gamma = 7.8$ grms/cm³

State the type of service for which the transformer is intended. Discuss reasons.

- 4 — Determine the dimensions of the iron core and window for a 250 KVA, 10000/525 V, 3 phase, star/star, core type, oil immersed, distribution transformer to operate at a frequency of 50 c/s, assuming :

Maximum flux density in the iron core 13000 lines/cm² and current density in the copper winding 2.7 amps/mm². Specific loss for the iron sheets used 1.3 W/kg at 10 Kilo — gauss and 50 c/s. Efficiency of transformer at full load 0.8 power factor is to be 97.6 %, with a total iron loss of 1200 W.

Find also the number of turns of the primary and secondary windings and their cross sectional areas.

(specific weight of iron = 7.8 grams per cubic cm.,

$C = 35$),

- 5 — Find suitable dimensions of the iron core and window

for a transformer rated at 200 KVA, having the following particulars :

6000/400 V, 50 c/s, delta/star, oil immersed. The specific iron loss for the sheets used is 1.2 watts/kg at 10 kilo — lines/sq. cm and 50 c/s. The efficiency at full load, 0.8 power factor is 96.6 %, with a total iron loss of 940 W. Assume a flux density in the iron core of 12800 lines/cm² and a current density in the winding of 2.7 amps/sq. mm. Take $C = 33$.

6 — Find the main dimensions of a 500 KVA, 6600/380 volt, 50 c.p.s. 3 phase, core type, delta/star, oil cooled transformer. The following design data may be assumed :

voltage per turn = 8.1 volts, current density = 2.2 amps/sq. mm.

maximum density in core and yoke = 12000 gauss.

window space factor = 0.20.

Assume that the iron section is single stepped cruciform ($A_{Fe} = 0.59 d^2$). Find also the iron losses, if the specific iron loss at 10000 gauss, 50 c.p.s. is 1.4 watts/kg, and the specific weight of iron is 7.8. Allow 20 % for additional iron loss.

If the maximum efficiency occurs when the transformer is delivering 71 % of its KVA rating, find the weight of copper.

7 — The weight of iron sheets used in a particular 3

phase, star/star, core type, 400 KVA, 20000/231 volt, 50 c/s oil immersed transformer is 600 kg, and the total weight of copper in the primary and secondary windings is 237 kg. The maximum flux density in the iron core is 13500 lines/cm², and the current density in the windings is 3 am²/mm². The iron sheets used have a specific loss of 1.2 watts/kg at 10000 lines/cm² and 50 c/s. Specific weight of iron 7.8 gm/cm³, $C = 32$, and a factor of 1.1 is to be taken to allow for additional iron losses.

- (a) Find the cross sectional area of the iron core as well as the window space factor.
- (b) Find the full load efficiency at 0.8 power factor lagging and also the fraction of full load at which maximum efficiency is obtained.
- (c) State for what kind of service the transformer is intended and explain briefly why.

8 — The weight of sheet steel in the cores and yokes of a particular 3 phase, 200 KVA, 50 c/s, 6000/525 V, star/star, oil immersed transformer is 3.7 times the weight of copper in the windings. The specific iron loss at 10000 gauss and 50 c/s is 1.4 W/Kg. The working flux density is 12500 lines/cm² and the mean current density is 2.5 am²/mm² at full load. Assuming that the efficiency at full load and unity power factor is 97.8 %, find :

- (a) the area of the iron core and the dimensions of the window.

(b) the number of turns of the primary and secondary windings.

(c) the fraction of full load at which maximum efficiency will be obtained.

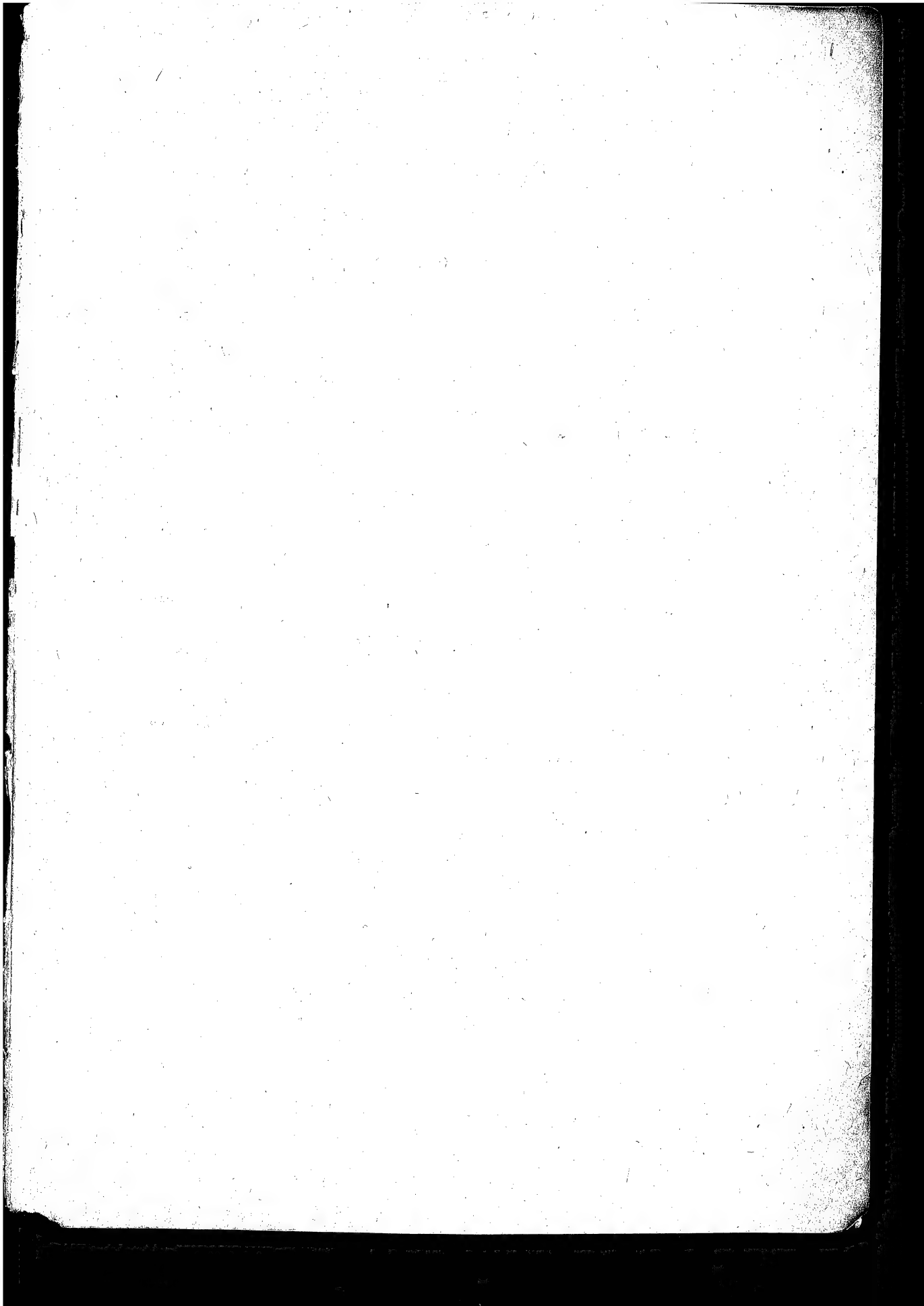
Density of iron = 7.8 gm/cm^3 ,

9 — Find the main dimensions of the core and window of a 150 KVA 10000/380 volt, 50 cps, 3 phase, core type, delta / star, oil immersed transformer. The following design data can be assumed : voltage per turn = 9.1, current density $d = 2.3 \text{ amp/sq. mm.}$ max flux density in core and yoke = 12500 gauss window space factor = 0.24, Height to window = 2.5: 1 transformer efficiency at full load, unity p.f. = 0.975 If the ratio of the weight of copper is 3 : 1 find the weight of iron and copper. Sp. iron loss at 12500 gauss 50 cps is 2.11 wt/Kg and sp. copper loss is $2.7 a^2$.

المراجع

(References)

- 1 — *Langsdorf* ; Theory of alternating current machinery.
Mc Graw - Hill book company, New York
and London.
 - 2 — *Say, M.G.* : The performance and desing of alternating
and *Pink, E.N.*; current machines, Sir Isaac Pitman and
Sons, Ltd., London.
 - 3 — *Boedfeld* : Elektrische Maschinen, Springer Verlag,
und *Sequenz* ; Wien.
 - 4 — *Richter* . Elektrische Maschinen, Verlag Birkhauser
Basel.
- — هندسة الآلات الكهربائية ، تأليف الدكتور محمد احمد قمر ، الناشر
منشأة المعارف بالاسكندرية (جلال حذى وشركاه)



محتويات الكتاب

صفحة

٧

مقدمة

الباب الاول

٩ ملفات المنتج في آلات التيسار المتردد

٩

قواعد عامة

٩

الملفات أحادية الطبقة

تكوين مجموعات الملفات والمراحل - الملفات المتمركزة -
الملفات الشبكية أو الماسية - توصيل الملفات في المرحلة
الواحدة على التوازي - الملفات ثنائية المراحل - الملفات
أحادية المراحل - الملفات كسرية المجرى

٤٥

الملفات مزدوجة الطبقة

٥٢

الإستخدامات المختلفة لأنواع الملفات

٥٣

توصيل أطراف المراحل لصندوق النهايات

الباب الثاني

٥٥ القوة الدافعة الكهربائية المنتجة في ملفات آلات التيار المتردد

٥٥

مقدمة

٥٧	معامل الآف عندما تكون q عددا صحيحا
٦٠	معامل الآف عندما تكون q عددا كسريا
٦٢	تأثير الانتشار المرحلى على معامل التوزيع ومقنن قدرة الآلة
٦٦	لتوافقيات في منحني المجال
٦٩	لتوافقيات في منحني الضغط المرحلى
٧٣	تأثير معامل التوزيع والمعامل التوتري على توافقيات الضغط المرحلى
٧٦	لتوافقيات في الضغط الخطي
٧٩	تموجات الاسنان
٨٣	أمثلة محلولة على البابين الاول والثاني
٩٢	مسائل على البابين الاول والثاني

الباب الثالث

٩٨	رد فعل المنتج ومعامل التنظيم في الآلات المتزامنة
٩٨	أولا : رد فعل المنتج والمجال المغناطيسى الدائر
٩٨	المجال المغناطيسى الناشئ عن ملفات المنتج ثلاثية المراحل
١٠٨	لتوافقيات الفراغية وعلاقتها بتوافقيات منحني التيار
١١٧	ثانيا : معامل تنظيم الضغط
١١٧	معنى معامل التنظيم
١٢٢	مخطط متجهات الآلة المتزامنة
١٢٥	١ - مخطط متجهات الآلة التوربينية

صفحة

ب — مخطط متجهات الآلة ذات الأقطاب البارزة ونظرية بلوندل
١٣٠ رد الفعل المزدوج

١٤٢ طرق تعيين معامل التنظيم

طريقة الأمبير لفات البسيطة — طريقة رد فعل المنتج — طريقة
المعاوقة المتزامنة — طريقة منحني التشبع بمعامل قدره صفر
— طريقة بواتيفيه لرسم منحني التشبع عند حمل معين بمعامل قدره
صفر

١٥٠ أمثلة محاولة على الباب الثالث

١٦٥ مسائل على الباب الثالث

الباب الرابع

١٧٤ خواص تشغيل الآلات المتزامنة

١٧٤ أولا : الآلة المتزامنة على حمل منفصل

تشغيل الآلة المتزامنة بممانعة تزامن ثابتة — حساب الضغط
الطرفي ومعامل التنظيم عند حمل معين — علاقات القدرة

١٨٩ ثانيا : تشغيل مولد تزامن على التوازي على حمل منفصل

٢٠١ ثالثا : الآلة المتزامنة على قضبان لانهاية

القضبان اللانهاية — عملية التزامن — ضبط قيمة التيار ومعامل
القدرة للآلة عندما تعمل كولد — أمثلة محاولة — المحرك

صفحة

المترامن على القضبان اللانهاية — منحنيات γ ومنحنيات σ

المحرك المترامن

٢١٩

أمثلة محلولة

٢٤٤

خواص التشغيل للمحرك المترامن — مثالان محلolan

٢٤٦

مسائل على الباب الرابع

الباب الخامس

٢٥٨

التأرجع والاتزان في الآلات المترامنة

ظاهرة التأرجع (أو التذبذب) — التردد الطبيعي للتأرجع

مثال محلول — الذبذبات المفروضة (أو القسرية) — مثال

محلول — تخميد الاهتزازات واستخدام الحداقة — اتزان

الآلات المترامنة.

٢٨٨

مسائل على الباب الخامس

الباب السادس

٢٩٠

تصميم الآلات المترامنة

٢٩٠

الابعاد الرئيسية أو الموجهة

٢٩٥

اختيار عدد المجارى وتصميم ملفات المنتج

٢٩٧

تحديد أبعاد المجرى

٣٠٠

تحديد عمق قلب المنتج تحت الأسنان

٣٠٠

طول الثغرة الهوائية

صفحة

٣٠١	عرض الفك فوق أسنان المنتج
٣٠٢	أبعاد القطب
٣٠٥	ترتيب ملفات المجال
٣٠٧	تحديد مساحة مقطع الموصل وضغط التنبيه
٣٠٨	كثافة التيار والمفقودات النحاسية في ملفات المجال
٣٠٩	حساب المقاومة وعماقة التسرب المرحلية
٣١٢	حساب ملفات التخميد
٣١٢	مثال لحلول
٣٢٢	مسائل على الباب السادس

الباب السابع

٣٢٨	القواعد الأساسية للمحول الكهربى
٣٢٨	دواعى استخدام المحول وتكوينه الاساسى
	تكوين المحول — أنواع المحولات مفردة المرحلة وثلاثية
	المراحل — الأنواع المختلفة لمقطع القلب الحديدى

الملفات

٣٣٦	مخطط متجهات المحول بدون حمل
٣٣٧	مخطط متجهات المحول بالحمل
٣٤٣	الدائرة المكافئة للمحول
٣٤٧	معامل التنظيم للمحول
٣٥٢	

٣٥٦	مخطط كاب لحساب معامل التنظيم
٣٥٧	اختبار اللاحل
٣٥٩	اختبار دائرة القصر
٣٦٢	حساب معامل التنظيم — معامل الجودة
٣٦٤	محولات القدرة
٣٦٥	محولات التوزيع
٣٦٧	أمثلة محلولة
٣٧٧	مسائل على الباب السابع

الباب الثامن

٣٨٧	توصيلات المحولات وتشغيلها على التوازي
٣٨٧	صيانة المحولات
٣٨٨	بعض أسباب الانهيار في المحولات
٣٨٩	المحولات ثلاثية المراحل
٣٩٤	التوصيل من ثلاث مراحل إلى مرحلتين
	طريقة سكوت للربط بين مجموعة ثلاثية المراحل وأخرى ثنائية المراحل
٤٠١	أمثلة محلولة
٤٠٦	المحول الذاتي
٤١٠	الوفر في نحاس المحول الذاتي

صفحة

٤١٣

الدائرة المكافئة للدول الذاتي

٤١٨

المحولات الذاتية ثلاثية المراحل

٤١٩

أمثلة محلولة

٤٢٢

الملف الثالث

٤٢٣

التيار الابتدائي في محول يحتوى على ملف ثالث

٤٢٤

مثال محلول

٤٢٥

تنظيم الضغط باستخدام المحولات

٤٢٦

تنظيم الضغط بتغيير نقطة التقسيم

٤٣٠

تشغيل المحولات على التوازي

شروط تشغيل المحولات على التوازي — نسبة تحويل الضغط

— هبوط الضغط النسبي في المحولين — قطعية الاطراف —

تعاقب المراحل

٤٣٦

توزيع الحمل (أو التيار) بين محولين على التوازي

٤٣٧

توزيع الحمل عندما تتساوى نسبتا للتحويل في المحولين

٤٤٢

توزيع الحمل عند اختلاف نسبة التحويل

٤٤٧

أمثلة محلولة

٤٥٢

مسائل على الباب الثامن

صفحة

الباب التاسع

٤٥٩	بعض المشاكل الهامة في المحولات واختباراتها
٤٥٩	التوافقيات في المحولات
٤٦٧	المتلاشيات
٤٦٧	ثلاثي التيار في المحولات
٤٧١	الضغوط العارمة في المحولات
٤٧٣	القوى الميكانيكية المؤثرة على الملفات
٤٧٨	حماية المحولات
٤٨١	اختبار المحولات

اختبارات الدائرة المفتوحة ودائرة القصر — تحديد قطبية
الملفات — اختبار التوصيل المتضاد — اختبار التيار الدائري
في المحولات الموصلة دلتا/دلتا

٤٨٦	أمثلة على محولة
٤٨٩	مسائل على الباب التاسع

الباب العاشر

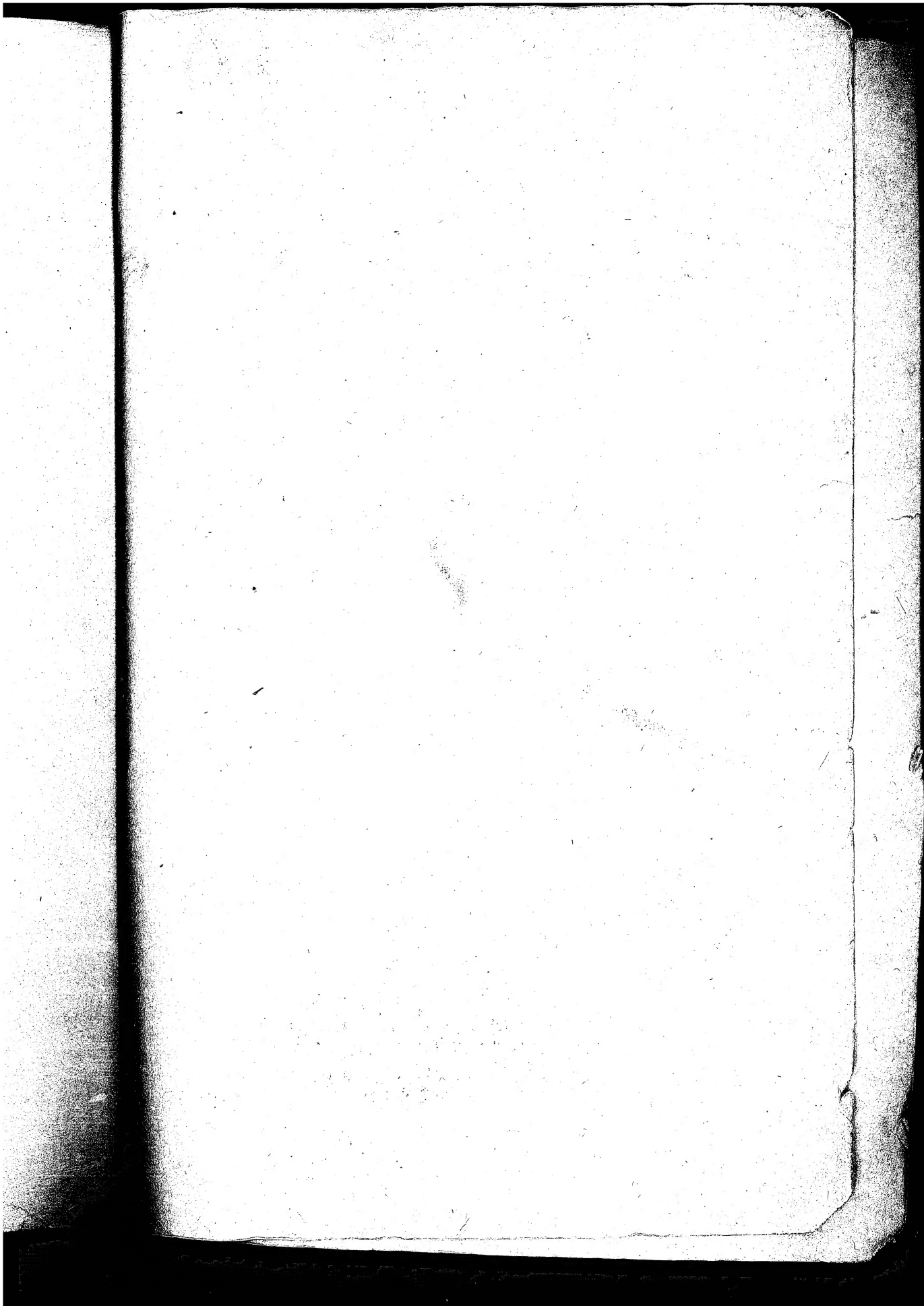
تصميم المحولات

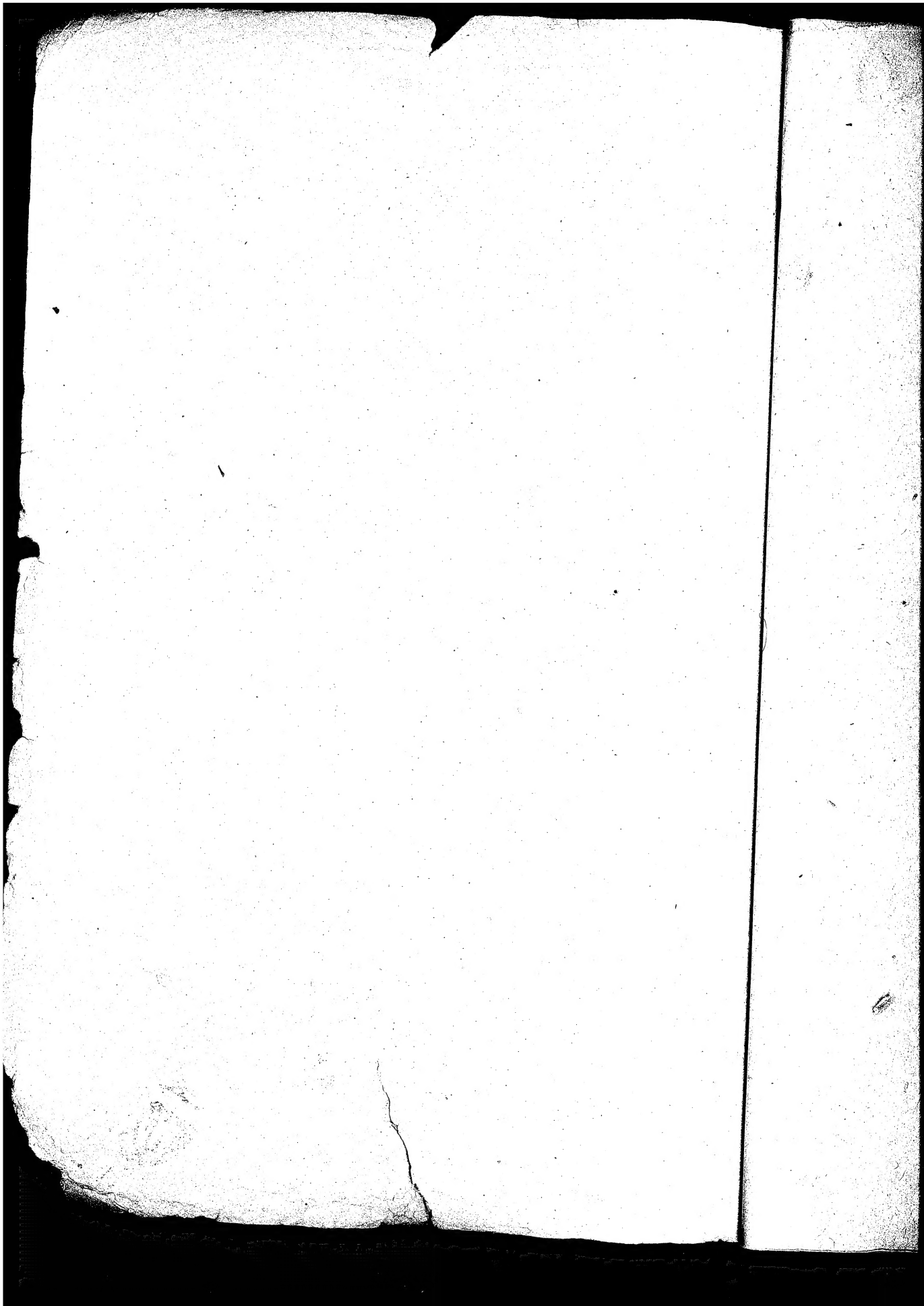
٤٩٠	الابعاد الرئيسية للمحول
٤٩١	مفقودات الحديد
٤٩٢	مفقودات مربع التيار

صفحة

	النسبة بين مفقودات الحديد ومفقودات النحاس — معامل الجودة
٤٩٤	والمفقودات النوعية
٤٩٦	مساحة مقطع الحديد في القلب أو الساق
٥٠٠	أبعاد النافذة
٥٠٤	ترتيب الملفات في النافذة
٥٠٨	عزل الملفات
٥١١	حساب تيار اللا حمل
٥١٨	صهر بيج الزيت
٥٢٥	معاوقة المحول وضغط الفصير
٥٣٢	أمثلة محلولة
٥٣٧	مسائل على الباب العاشر
٥٤٣	المراجع
٥٤٨	محتويات الكتاب

رقم الإيداع بدار الكتب
تم بحمد الله ، طبع هذا الكتاب في
شركة الاسكندرية للطباعة والنشر
١ شارع فنتورا بجوار سيدى عبدالرزاق
تليفون : ٣٥٨٤١





مجموعة الكتب الهندسية

- ١ - مقاومة واختبار المواد . أول
- ٢ - مقاومة واختبار المواد . ثاني
- ٣ - الحيلولة الهندسية
- ٤ - تصميم الآلات . انجليزي
- ٥ - الاختبارات غير المتلفة وتحليل الاجهادات بالطرق التجريبية
- ٦ - مبادئ المساحة المستوية والطبوغرافية
- ٧ - أسس الهندسة الكهربائية . أول
- ٨ - أسس الهندسة الكهربائية . ثاني
- ٩ - الرفاصات البحرية . انجليزي
- ١٠ - محركات الاحتراق
- ١١ - هندسة القوى الكهربائية . انجليزي
- ١٢ - هندسة الآلات الكهربائية
- ١٣ - نظريات وتصميم الآلات الكهربائية : الآلات المترامنة والمحولات الكهربائية
- ١٤ - هندسة القوى الكهربائية . عربي جزء أول

مجموعة الكتب الهندسية

- ١ - مقاومة واختبار المواد . أول
- ٢ - مقاومة واختبار المسواد . ثاني
- ٣ - الجيولوجيا الهندسية
- ٤ - تصميم الآلات . انجليزى
- ٥ - الاختبارات غير المتلفة وتحليل الاجهادات بالطرق التجريبية
- ٦ - مبادئ المساحة المستوية والطبوغرافية
- ٧ - أسس الهندسة الكهربائية . أول
- ٨ - أسس الهندسة الكهربائية . ثاني
- ٩ - الرافعات البحرية . انجليزى
- ١٠ - محركات الاحتراق
- ١١ - هندسة القوى الكهربائية . انجليزى
- ١٢ - هندسة الآلات الكهربائية
- ١٣ - نظريات وتصميم الآلات الكهربائية : الآلات المتزامنة والمحولات الكهربائية
- ١٤ - هندسة القوى الكهربائية . عربى جزء أول